

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Приладобудування
(повна назва інституту/факультету)

Приладобудування
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 62-581.7
(універсальна десятична класифікація.
Для визначення УДК конкретної дисертації
студенту слід звернутися в 1-й зал бібліотеки)

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ М.Д. Гераїмчук
(підпис) (ініціали, прізвище)
“ ____ ” грудня 2018 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістр**

зі спеціальності (спеціалізації) 152 Метрологія та інформаційно-вимірю-
вальна техніка (Інформаційні технології та
вимірювальні системи механіки)
(код і назва)

на тему: “Дослідження двоканального сильнодемпфованого вимірювача”

Виконав (-ла): студент (-ка) 2 курсу, групи ПІ-71мп
(шифр групи)

Іващенко Олена Андріївна
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник д.т.н., проф., Безвесільна О.М.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант Розробка СТАРТАП-проекту к.е.н., доц., Бояринова К.О.
(назва розділу) (посада, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет _____ Приладобудівний
(повна назва)

Кафедра _____ Приладобудування
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність(спеціалізація) 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка (Інформаційні технології та вимірювальні системи механіки)
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ М.Д.Гераїмчук
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » листопада 2018 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

_____ Іващенко Олені Андріївні _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації “Дослідження двоканального сильнодемпфованого вимірювача”

науковий керівник дисертації Безвесільна Олена Миколаївна, д.т.н., проф.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «05» листопада 2018 р. № 4078-с

2. Строк подання студентом дисертації 6 грудня 2018р

3. Об'єкт дослідження процес вимірювання прискорення сили тяжіння шляхом використання двоканального п'єзоелектричного гравіметра.

4. Предмет дослідження (вихідні дані для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) двоканальний п'єзоелектричний гравіметр.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити провести аналітичний огляд науково-літературних джерел та зробити патентний пошук з теми досліджуваного; надати опис конструкції та викласти принцип дії нового двоканального п'єзоелектричного гравіметра; розробити математичну модель двоканального п'єзоелектричного гравіметра; дослідити шляхи утворення систематичних та випадкових похибок каналу вимірювання та запропонувати способи їх зменшення; провести експериментальні дослідження нового двоканального п'єзоелектричного гравіметра.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного (графічного) матеріалу 6.1. Презентаційний лист – 1 арк. ф. А1; 6.2. Матеріали аналітичного огляду – 1 арк. ф.А1; 6.3. Схеми розміщення чутливого елемента в п'єзоелектричному гравіметрі – 1 арк. ф. А1; 6.4. Структурна схема гравіметричної системи – 1 арк. ф. А1; 6.5. Складальний кресленник – 1 арк. ф. А1; 6.6. Графіки залежності вихідної напруги– 1 арк. ф. А1.

7. Орієнтовний перелік публікацій 7.1. Способи розміщення чутливого елемента п'єзоелектричного гравіметра авіаційної гравіметричної системи.

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розробка СТАРТАП-проекту	Бояринова К.О., к.е.н., доц.		

9. Дата видачі завдання 2 листопада 2018р

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Ознайомлення з завданням	03.09.18	
2	Огляд і аналіз літератури	10.09.18 – 18.09.18	
3	Аналіз методів вимірювання прискорення	19.09.18 – 23.09.18	
4	Порівняння характеристик гравіметрів	23.09.18 – 30.09.18	
5	Розробка математичної моделі	01.10.18 – 05.10.18	
6	Теоретичні дослідження	08.10.18 – 12.10.18	
7	Експериментальні дослідження	15.10.18 – 02.11.18	
8	Оформлення МД та її графічної частини	27.11.18	
9	Представлення МД науковому керівнику	5.12.18	
10	Передача матеріалів МД на виявлення збігів/схожості текстів сервісом Unichек	6.12.18	

Студент

(підпис)

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника

ВІДОМІСТЬ МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на магістерську дисертацію	2	
2	A4	МД.ПЗ	Пояснювальна записка	95	
3	A1	МД.ГД.01	Матеріали аналітичного огляду	1	
4	A1 (A2)	МД. ГД.02	Схеми	2	
5	A1 (A2)	МД.ГД.03	Складальні креслення	1	
6	A1	МД.ГД.04	Графіки	1	
7	A1	МД.ГД.05	Презентаційний аркуш	1	
Загальна кількість графічних документів - 6 арк.ф. А1					

				МД.ВМД		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Іващенко О.А.			Відомість магістерської дисертації	Лист	Листів
Керівн.	Безвесільна О.М.				1	1
Конс.	Бояринова К.О.				КПІ імені Ігоря Сікорського каф. ПБ гр. ПІ – 71мп	
Н/контр.						
Зав.каф.	Гераїмчук М.Д.					

Реферат

Об'єктом дослідження в даній роботі є процес вимірювання прискорення сили тяжіння, а **предметом** – двоканальний п'єзоелектричний гравіметр.

Досліджується датчик прискорення безпосередньо за допомогою сукупності теоретичних та практичних методів. Сам процес підвищення точності вимірювань здійснюється шляхом створення другого каналу вимірювання. Для цього чутливий елемент виконано з двома каналами.

Метою даної роботи є підвищення точності та швидкодії вимірювань прискорення сили тяжіння шляхом вдосконалення двоканального п'єзоелектричного гравіметра автоматизованої гравіметричної системи. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити ряд задач, а саме: розробити математичну модель двоканального ПГ; вирішити проблему покращення параметрів вихідного сигналу двоканального ПГ; дослідити основні зовнішні завади двоканального ПГ та запропонувати способи їх зменшення.

Структура та обсяг роботи. Дана робота складається з реферату, вступу, 4 основних розділів, переліку використаних літературних джерел. Робота розміщена на 125 сторінках основного тексту і містить 36 рисунків, 32 таблиці. Кількість інформаційних джерел містить 26 найменувань.

Ключові слова: прискорення сили тяжіння, п'єзоелемент, гравіметрія, авіаційна гравіметрична система, чутливий елемент.

Abstract

The object of research in this paper is the process of measuring the acceleration of gravity, and ***the subject*** is a two-channel piezoelectric gravimeter.

The accelerometer sensor is explored directly with the help of a set of theoretical and practical methods. The process of increasing the accuracy of measurements is carried out by creating a second measurement channel. For this, a sensitive element is made with two channels.

The purpose of this work is to increase the accuracy and speed of gravity acceleration measurements by improving the two-channel piezoelectric gravimeter of an automated gravimetric system. In order to achieve this goal, it is necessary to solve a number of problems, namely: to develop a mathematical model of two-channel GHG; solve the problem of improving the parameters of the output signal of two-channel GHG; to investigate the main external obstacles of the two-channel GHG and to propose ways to reduce them.

Structure and scope of work. This work consists of a lecture, an introduction, 4 main sections, a list of used literary sources. The work is located on 125 pages of the main text and contains 36 figures, 32 tables. The number of information sources contains 26 names.

Key words: acceleration of gravity, piezoelement, gravimetry, aviation gravimetric system, sensitive element.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, скорочень та термінів.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ СУЧАСНОЇ ГРАВІМЕТРІЇ.....	13
1.1. Аналіз літературних джерел у галузі гравіметрії	13
1.2. Методи вимірювання прискорення сили тяжіння	14
1.3. Порівняльна характеристика засобів вимірювання прискорення сили тяжіння.....	16
1.4. Двоканальний п'єзоелектричний гравіметр	19
1.5. Висновки до розділу 1	26
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОКАНАЛЬНОГО П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ГРАВІМЕТРА	27
2.1. Спрощена математична модель двоканального п'єзоелектричного гравіметра	27
2.2. Математична та механічна моделі двоканального п'єзоелектричного гравіметра	30
2.3. Способи закріплення п'єзоелемента у конструкції ДПГ	35
2.4. Аналіз та вибір п'єзоматеріалів для чутливого елемента п'єзоелектричного гравіметра	41
2.5. Розрахунок основних електричних параметрів п'єзоелектричного гравіметра	45
2.6. Визначення основних характеристик п'єзоелектричного гравіметра ..	47
2.7. Високоточний спосіб виставлення осі чутливості п'єзоелектричного гравіметра	51
2.8. Склад і структура похибок двоканального п'єзоелектричного гравіметра	53
2.9. Передатна функція двоканального п'єзоелектричного гравіметра	64
2.10. Дослідження стійкості двоканального п'єзоелектричного гравіметра	74
2.11. Висновки до розділу 2	77

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОКАНАЛЬНОГО П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ГРАВІМЕТРА	79
3.1. Опис експериментальної установки для досліджень двоканального п'єзоелектричного гравіметра	79
3.1.1. Вібростенд експериментальної установки	81
3.1.2. Досліджуваний двоканальний п'єзоелектричний гравіметр	84
3.1.3. Операційний підсилювач	85
3.1.4. Мікросистема зібрання даних	86
3.2. Експериментальні дослідження характеристик п'єзоелектричного гравіметра	91
3.3. Усереднення даних про аномалії прискорення сили тяжіння	95
3.4. Градувальна характеристика п'єзоелектричного гравіметра	96
3.5. Визначення базових параметрів роботи макету	100
3.6. Проведення експерименту	100
3.7. Визначення метрологічних характеристик п'єзоелектричного гравіметра	103
3.8. Висновки до розділу 3	104
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА САРТАП-ПРОЕКТУ “СТАБІЛІЗАТОР ОЗБРОЄННЯ ЛЕГКОЇ БРОНЬОВАНОЇ ТЕХНІКИ”	105
4.1. Опис ідеї проекту	105
4.2. Технологічний аудит ідеї проекту	107
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	108
4.4. Розробка ринкової стратегії проекту	115
4.5. Розробка маркетингової програми стартап-проекту	117
4.6. Висновки до розділу	120
ВИСНОВКИ	122
ІНФОРМАЦІЙНІ ДЖЕРЕЛА	124

Перелік умовних позначень, скорочень та термінів

- ПГ – п'єзоелектричний гравіметр;
- ДПГ – двоканальний п'єзоелектричний гравіметр;
- АГС – авіаційна гравіметрична система;
- ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;
- ПСТ – прискорення сили тяжіння;
- БЦОМ – бортова цифрова обчислювальна машина;
- ІМ – інерційна маса;
- ЧЕ – чутливий елемент;
- ЛА – літальний апарат;
- ПЕ – п'єзоелемент;

ВСТУП

Силове поле, зумовлене тяжінням маси Землі і відцентровою силою, яка виникає внаслідок добового обертання Землі називається гравітаційним полем Землі. Воно незначною мірою залежить ще й від тяжіння Сонця, Місяця та інших небесних тіл та маси земної атмосфери. Гравітаційне поле Землі характеризується силою тяжіння, потенціалом сили тяжіння та різними його похідними.

Основи гравітаційного поля Землі використовуються у різноманітних наукових дослідженнях, що пов'язані з реалізацією задач інженерної геології, таких як визначення форми Землі, оцінки пружних деформацій поверхні планети, побудови моделей руху глибинних мас, проведення тектонічного районування, передбачення землетрусів, пошуку родовищ корисних копалин та інше.

Вимірювання сили тяжіння та прискорення сили тяжіння складають основу гравітації та були покладені в основу створення засобів вимірювальної техніки для визначення основних параметрів гравітації.

Гравіметричні вимірювання можна розподілити на наземні, підводні (на підводному човні) та авіаційні (за допомогою літального апарату).

Наземні вимірювання забезпечують найбільш високу точність (0,01 мГал). Однак, вони здійснюються повільно. Також такі вимірювання недоступні в районах полюсів, екватора, океанів.

Морські вимірювання мають меншу точність, аніж наземні вимірювання (0,1 – 0,5 мГал), а також морські вимірювання неможливі у гірських та у віддалених районах океанів.

Авіаційні вимірювання дозволяють здійснювати вимірювання у важкодоступних районах Землі зі швидкістю значно більшою, ніж наземні.

Також можна підкреслити, що авіагравіметричні вимірювання на відміну від морських відрізняються наступним:

- висока швидкість носія вимагає обмежити час осереднення і забезпечити високу точність навігаційного забезпечення;
- широкий спектр збурюючих прискорень вимагає крім демпфування і фільтрації високочастотних прискорень реєстрації та обліку низькочастотних прискорень;
- зміни висоти викликають зміни сили тяжіння на $\pm 0,3$ мГал;
- згладжування поля сили тяжіння зі збільшенням висоти.

Для цих цілей використовують авіаційні гравіметричні системи (АГС), чутливим елементом яких є гравіметр. Дані про гравітаційне поле Землі суттєво підвищують точність визначення навігаційних параметрів та ефективність гравіметричної розвідки, при введенні у пам'ять бортової цифрової обчислювальної машини (БЦОМ) АГС.

Існуючі на сьогоднішній день гравіметри мають недостатню точність (2-10 мГал) та швидкодію вимірювань і обробки вимірюваної інформації. Більшість із гравіметрів є неавтоматизованими та одноканальними. До того ж цими гравіметрами вимірюється прискоренням сили тяжіння g разом з вертикальним прискоренням \ddot{h} . Високоточне вимірювання \ddot{h} є складною науково-технічною проблемою і вимагає застосування іншого підходу методики вимірювань та схемо-технічних рішень – наприклад, використання методу двоканальності. В літературі з авіаційної гравіметрії [7] показано, що одним з найбільш досконалих є п'єзоелектричний гравіметр (ПГ).

Актуальність теми

Актуальною науково-технічною задачею є підвищення точності та швидкодії вимірювань прискорення сили тяжіння шляхом удосконалення двоканального п'єзоелектричного гравіметра автоматизованої АГС.

Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є підвищення точності та швидкодії вимірювань прискорення сили тяжіння шляхом вдосконалення двоканального п'єзоелектричного гравіметра автоматизованої гравіметричної системи.

Основні задачі:

- провести аналітичний огляд науково-літературних джерел та зробити патентний пошук з теми досліджуваного у галузі авіаційної гравіметрії, надати порівняльну характеристику існуючих гравіметрів, вказати їх переваги та недоліки;
- надати опис конструкції та викласти принцип дії нового двоканального п'єзоелектричного гравіметра;
- розробити математичну модель двоканального ПГ;
- вирішити проблему покращення параметрів вихідного сигналу двоканального ПГ;
- дослідити основні зовнішні завади двоканального ПГ та запропонувати способи їх зменшення;
- дослідити шляхи утворення систематичних та випадкових похибок каналу вимірювання та запропонувати способи їх зменшення;
- здійснити, за допомогою ЕОМ, математичне моделювання роботи розробляемого ПГ, проаналізувати результати моделювання;
- провести експериментальні дослідження нового двоканального ПГ.

Об'єкт дослідження: процес вимірювання прискорення сили тяжіння шляхом використання двоканального п'єзоелектричного гравіметра.

Предмет дослідження: двоканальний п'єзоелектричний гравіметр.

Методи дослідження:

- огляд та аналіз науково-технічної літератури з теми досліджуваного питання;
- провести патентний пошук існуючих та заявлених ПГ;
- аналіз принципу дії п'єзоелектричного перетворювача для виведення математичної моделі ПГ;
- метод усунення впливу завад на вихідний сигнал двоканального ПГ;
- методи теорії випадкових процесів для аналізу точності ПГ;
- теоретичні дослідження ПГ із урахуванням діючих на нього параметрів зовнішнього збурення;
- аналіз методів інтелектуальних обчислень на основі штучних нейронних мереж ;
- теорії синтезу вимірювальних інформаційних систем для розробки системи реєстрації сигналу ПГ ;
- експериментальні дослідження ПГ з використанням обчислювальних комп'ютерних програм для підтвердження адекватності висновків теоретичних досліджень.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ СУЧАСНОЇ ГРАВІМЕТРІЇ

Сучасний систематизований аналіз стану гравіметрії у відомих літературних джерелах практично відсутній. Отже, задачами розділу є:

- провести аналіз науково-літературних джерел у галузі авіаційної гравіметрії;
- проаналізувати переваги і недоліки існуючих гравіметрів;
- обґрунтувати доцільність нового двоканального п'єзоелектричного гравіметра.

1.1. Аналіз літературних джерел у галузі гравіметрії

Розвиток гравіметрії складається із таких основних етапів вимірювання:

- 1) на нерухомій основі – на поверхні Землі;
- 2) на підводному та надводному човнах – на просторах Світового Океану;
- 3) на літальних апаратах.

Великий внесок у теорію і практику гравіметричних вимірювань було зроблено низкою вчених, які працювали під керівництвом видатних радянських гравіметристів: Ф.М. Красовського, Л.В. Сорокіна, О.О. Михайлова, Б.В.

Велику роль у розробці гравіметричних вимірювань відіграли і роботи закордонних вчених – Д. Гаррісона, А. Графа, М. Піка, В.М. Каула, Л. Лакоста, Ю.Томоди, М.Гальвані, Т. фон Оппольцера та ін.

Інтенсивно проводять гравіметричні дослідження у декількох великих науково-технічних центрах:

- Науковому Центрі аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України під керівництвом В.І. Лялько, ННЦ “Інститут метрології” (м. Харків) під керівництвом Дудолада О.С.;

- РВ ВІАУ(м. Рига) під керівництвом А.А. Веселова;
- ЦНДІ “Азимут” (м. Санкт-Петербург) під керівництвом Л.П. Несенюка, Г.Б. Вольфсона, Б.А. Блажнова;
- ВВІАУ ім. професора М.Є. Жуковського (м. Москва) під керівництвом А.А. Красовського, А.І. Сороки.

В останні десятиліття гравіметричні дослідження здійснюються переважно на підводних та надводних судах. Успішні випробування гравіметрів у морських умовах спричинили наступне завдання – дослідити можливість проведення гравіметричних вимірювань на борту літальних апаратів (ЛА).

Вимірювання прискорення сили тяжіння (ПСТ) на борту ЛА є більш складним завданням, аніж на кораблі. Суттєвою ж є відмінність, яка полягає у наявності довгоперіодичних вертикальних ПСТ у аерогравіметричних вимірюваннях. Якщо для морських гравіметричних вимірювань точність близько 1 мГал реально досяжна, то для повітряних вимірювань указана точність поки що є проблематичною.

Перші спроби визначення ПСТ на борту ЛА були здійснені у СРСР і США у 1956-1960 рр. XX ст. за допомогою морських модифікованих гравіметрів. З 60-х років починаються розробки гравіметрів для вимірювання ПСТ безпосередньо на борту ЛА.

1.2. Методи вимірювання прискорення сили тяжіння

В основі сучасних методів вимірювання ПСТ лежить використання наступних закономірностей:

- 1) залежність від сили тяжіння шляху, пройденого вільно падаючим тілом:
- 2) зв'язок періоду власних коливань маятника постійної довжини з величиною ПСТ – маятниковий метод вимірювання;

3) залежність від ПСТ частоти коливань струни, на нижньому кінці якої закріплений вантаж. Заснований на цьому принципі прилад носить назву струнним гравіметром. Ці методи динамічними бо передбачають спостереження руху тіла.

4) зміна положення рівноваги у пружинних вагах, на яких зважується вантаж незмінної маси. При цьому виникає додаткова деформація пружного елемента вагою (пружини або крутильної нитки), яку вимірюють. Цей метод вимірювань називають статичним, а прилади – статичними гравіметрами.

Існують також абсолютні і відносні вимірювання ПСТ. При абсолютних вимірюваннях визначають повну величину ПСТ у точці спостереження. У цьому випадку, окрім часу вимірюють лінійні відстані, наприклад, довжину маятника або шлях, пройдений вільно падаючим тілом. При відносних вимірюваннях визначають не повне значення ПСТ у даному пункті, а приріст (різницю) ПСТ у даній точці спостереження відносно деякого іншого, вихідного – значення g у якому, звичайно, відоме.

Методи вимірювання прискорення сили тяжіння і його приросту діляться на *динамічні* і *статичні*.

Під динамічними розуміються такі методи, в яких спостерігається рух тіла під дією сили тяжіння (гойдання маятника, вільне падіння тіл і ін.) В цьому випадку g визначається через параметри руху тіла і параметри установки. У статичних методах дія сили тяжіння компенсується (наприклад, силою пружності пружини), а g визначається по зміні статичного положення рівноваги тіла.

Динамічні методи вимірювання ПСТ можуть бути і абсолютними, і відносними, статичні тільки відносними. Найбільш поширений динамічний метод – маятниковий.

Хоча маятникові прилади і схильні до впливів температури, вологості та інших чинників, вони характеризуються високою точністю. Похибку

абсолютного прискорення сили тяжіння маятниковими приладами можна довести до 1 - 3 мГал, а відносного - при наземних дослідженнях - до 0,1 мГал, при морських зйомках - до 5 - 10 мГал.

Визначення абсолютного значення прискорення сили тяжіння можна проводити методом вільного падіння, коли вимірюється час вільного падіння тіла і відстань, пройдену тілом. Однак даний метод відрізняється великою трудомісткістю і виконується на обсерваторіях, де точність у визначенні g можна довести до 0,01 мГал.

Нині також відомі методи абсолютних і відносних вимірювань сили тяжіння, засновані на вивченні коливань струн. У них вимірюється частота коливань струни, її довжина і маса. Однак, огляд літератури показав, що точність вказаних методів та засобів є низькою – 2-10 мГал.

1.3. Порівняльна характеристика засобів вимірювання прискорення сили тяжіння

Можливість вимірів сили тяжіння на борту літака була доведена рядом експериментів, розпочатих в 1958 р. Зокрема, було встановлено, що на літаках можна застосовувати морські гравіметри, а точність аерогравіметричних визначень залежить від точності навігації і насамперед від точності визначення висоти. Тож ефективність роботи АГС, значною мірою, забезпечується вибором чутливого елемента системи – гравіметра. Нині існує декілька типів гравіметрів АГС, які мають як свої переваги, так і недоліки. Розробками сучасних моделей гравіметрів АГС та підвищенням їх точності займаються провідні технічні університети США, Японії, Німеччини, Росії та інших країн світу.

Найбільш відомим гравіметрам АГС притаманні як переваги, так і суттєві недоліки (див. табл. 1.1), серед яких основними є:

- 1) низька точність вимірювання ((2 – 10) мГал);
- 2) обов'язкова необхідність застосування процедури фільтрації вихідного сигналу гравіметра АГС;

3) нестабільність статичного передатного коефіцієнта гравіметра АГС, спричинена змінами властивостей конструктивних елементів;

4) невисока швидкодія та відсутність можливості оперативної обробки інформації та інші.

Таблиця 1.1

Порівняльні характеристики існуючих гравіметрів АГС

Тип	Позначення	Точність вимірювань g	Недоліки
Кварцові	ГІ 1/1	6 мГал	Велика постійна часу; недостатня швидкодія та точність; низька чутливість
	“Чекан-АМ”	6 мГал	
	“ГРІН-2000/М”	5 мГал	
Магнітні	Bell BGM-2, Bell VM-IX, Autonetics VM-7G, МАГ-1М, GT-1А, GT-2А	8 мГал	Нестабільність магнітних властивостей постійного магніту; недостатні швидкодія та точність
Струнні	ГСД-М	8 мГал	Нестабільність пружних властивостей струни; можливість резонансів; недостатні швидкодія та точність
	“ГРАВІТОН-М”	5 мГал	
Гіроскопічні	PIGA 16, 25	3 мГал	Висока собівартість; складність конструкції; недостатні швидкодія та точність
	ГІЛП	2 мГал	
П’єзоелектричні одноканальні	ПГ	2 мГал	Немає компенсації інструментальних похибок та залишкових похибок від впливу вертикального прискорення

Таким чином, з табл.1.1 видно, що відомі гравіметри мають недостатню точність (2-10 мГал) та швидкодію. Найбільш перспективним є п'єзоелектричний одноканальний гравіметр [3]. Однак цей ПГ також має суттєві недоліки: в ньому відсутня компенсація інструментальних похибок та залишкових похибок від впливу вертикального прискорення. Вказані недоліки можливо подолати, якщо у якості гравіметра автоматизованої АГС застосувати двоканальний п'єзоелектричний гравіметр [8].

Доцільність досліджень у цьому напрямку підтверджується тим, що п'єзоелектричні чутливі елементи вважаються найкращими для застосування у якості чутливих елементів у системах інерціальної навігації та у системах керування балістичними ракетами. Ці пристрої конструювались для використання у складних динамічних умовах (перенавантаження по осі вимірювання понад 50 g; діапазон температур: $(-80 \dots +200)^\circ\text{C}$; тиск повітря у негерметизованих відсіках: (700..800) мм рт.ст. біля поверхні Землі та 10^{-6} мм рт.ст. на висоті 200км). Динамічні умови на літаку при виконанні гравіметричних вимірювань є набагато простішими [2]. Саме тому прийнято рішення про проведення більш ґрунтовних досліджень стосовно доцільності застосування у якості гравіметра автоматизованої АГС саме двоканального п'єзоелектричного гравіметра.

Сформулюємо умови, при яких будемо аналізувати роботу нового ПГ, базуючись на результатах досліджень [2]. Роботу ПГ автоматизованої АГС будемо аналізувати при таких можливих параметрах віброприскорень: амплітудах по поперечній і нормальній осях – до g, по повздовжній осі – до 0.7 g і переважних частотах близько 1640 c^{-1} для поступальних віброприскорень; амплітудних кутах нукання – до $65'$, крену – до $147'$, тангажу – до $34'$ і переважних частотах близько 0.02 c^{-1} для кутових віброприскорень.

У роботах [2], [7] визначено, що гравіметр АГС (досліджуваний ПГ також) встановлюється у зоні літака, віддаленій від шуму та вібрації двигунів.

1.4. Двоканальний п'єзоелектричний гравіметр

Визначені у попередньому параграфі узагальнені недоліки існуючого одноканального п'єзогравіметра АГС [3] повністю або частково усуваються за рахунок того, що у якості гравіметра АГС застосовується двоканальний ПГ.

Суттєвим недоліком одноканального п'єзогравіметра авіаційної гравіметричної системи є низька точність вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння.

Підвищення точності вимірювання у досліджуваному двоканальному гравіметрі забезпечується за рахунок того, що створено другий канал вимірювання. Для цього чутливий елемент виконано з двома каналами. П'єзоелементи першого та другого каналів вимірювання є ідентичними та прикріплені до верху та низу герметичного корпусу гравіметра відповідно. Інерційна маса через пружину прикріплена до низу п'єзопластин п'єзоелемента першого каналу та через таку ж пружину прикріплена до верху п'єзопластин п'єзоелемента другого каналу. П'єзоелемент першого каналу працює на основі деформації розтягу, а п'єзоелемент другого каналу – на основі деформації стиснення.

Вихідні електричні сигнали п'єзопластин обох каналів надходять на вхід операційного підсилювача. Результируючий корисний електричний сигнал буде пропорційним подвоєному сигналу прискорення сили тяжіння та надходитиме через аналогово-цифровий перетворювач до БЦОМ.

У БЦОМ будуть проводитись необхідні розрахунки для визначення значення аномалій прискорення сили тяжіння за відповідним алгоритмом [4], де також буде враховано поправку на вплив похибки від переносної (відносно гравіметра) кутової швидкості обертання Землі.

Отже, завдяки використанню додатково введенного другого каналу вимірювання, забезпечується відсутність у вихідному сигналі гравіметра системи-винаходу сигналів похибок від залишкової неідентичності

конструкцій однакових п'єзопластин та мас, від впливу зміни температури, вологості та тиску зовнішнього середовища (тобто інструментальних похибок), які можуть бути значними. Також відбувається усунення впливу вертикального прискорення літака на покази гравіметра одразу двома способами: 1 – за рахунок встановлення частоти власних коливань п'єзоелементів гравіметра рівними частоті перетину спектральних щільностей корисного сигналу прискорення сили тяжіння та сигналу основної завади вертикального прискорення літака (як у прототипі); 2 – завдяки використанню додатково введеного другого каналу вимірювання. Використання операційного підсилювача та аналогово-цифрового перетворювача реалізують додавання та підсилення вихідних аналогових сигналів обох каналів гравіметра та перетворювання їх у цифровий код відповідно. У БЦОМ буде визначатись значення аномалій прискорення сили тяжіння враховуючи поправку на вплив похибки від переносної (відносно гравіметра) кутової швидкості.

Таким чином, запропонована авіаційна гравіметрична система для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння забезпечує суттєве підвищення точності вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння.

Принцип дії двоканального ПГ пояснюється кресленням (рис. 1.11), де зображено структурну схему авіаційної гравіметричної системи для вимірювання аномалій прискорення сили тяжіння.

Авіаційна гравіметрична система для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння містить систему 1 визначення навігаційних параметрів, вимірювач 2 висоти та встановлений на двовісній платформі 12 гравіметр 3, виходи яких підключені до входів БЦОМ 4.

Чутливий елемент гравіметра 3 розміщений у герметичному корпусі 13 і виконаний з двома каналами, в кожному з яких встановлено по одному п'єзоелементу 5 і 6, що є ідентичними і виконані у вигляді п'єзопластин, а інерційна маса 7 через пружину 8 прикріплена до низу п'єзопластин

п'єзоелемента 5 одного каналу та через пружину 9 прикріплена до верху п'єзопластин п'єзоелемента 6 другого каналу. Виходи п'єзопластин обох каналів з'єднані з входами операційного підсилювача 10, вихід якого з'єднаний через аналогово-цифровий перетворювач 11 із входом БЦОМ 4.

Авіаційна гравіметрична система для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння працює наступним чином.

На п'єзоелементи обох каналів діє прискорення сили тяжіння g_z , вертикальне прискорення $\Delta\ddot{z}$ літака та інструментальні похибки Δi від впливу залишкової неідентичності конструкцій однакових п'єзопластин та мас, від впливу зміни температури, вологості та тиску зовнішнього середовища. Якщо спроектувати всі ці впливи на вимірювальну вісь Oz гравіметра-винаходу та врахувати те, що п'єзоелемент 6 працює на стиснення, а п'єзоелемент 5 – на розтяг, то отримаємо [4]:

$$u_1 = k(mg_z + m\Delta\ddot{z} + \Delta i);$$

$$u_2 = k(mg_z - m\Delta\ddot{z} - \Delta i),$$

де u_1 – вихідний електричний сигнал п'єзопластин одного каналу;

u_2 – вихідний електричний сигнал п'єзопластин іншого каналу;

m – вага інерційної маси у кожному каналі;

k – п'єзоелектрична стала.

Вихідні електричні сигнали u_1 та u_2 п'єзопластин обох каналів додаються в операційному підсилювачі 10:

$$u_\Sigma = u_1 + u_2 = 2kmg_z, \quad (1.1)$$

де u_Σ – вихідний сигнал операційного підсилювача 10.

Для здійснення процесу додавання двох сигналів необхідно з'єднати виходи п'єзопластин таким чином, що одна з напруг буде від'ємною інша додатною. У такому випадку механізм формування вихідного сигналу математично описується наступним виразом :

$$U_o = f_z = (U_2 - U_1) \cdot \frac{R_{33}}{R_1}. \quad (1.2)$$

Якщо напруга U_1 від'ємна, то формула набуває вигляду:

$$U_o = f_z = (U_2 + U_1) \cdot \frac{R_{33}}{R_1} = (2U_1) \cdot \frac{R_{33}}{R_1}. \quad (1.3)$$

Вихідний сигнал операційного підсилювача 10 U_o подається на аналого-цифровий перетворювач 11, де перетворюється у цифровий та надходить до БЦОМ 4.

На вхід БЦОМ 4, куди подається вихідний сигнал гравіметра 3, також подаються вихідні сигнали від системи 1 визначення навігаційних параметрів та вимірювача 2 висоти. БЦОМ 4 на основі отриманих даних обчислює аномалії Δg прискорення сили тяжіння за формулою [7]:

$$\Delta g = f_z + E + A - \gamma_0, \quad (1.4)$$

де f_z – вихідний сигнал гравіметра 3;

E – поправка Етвеша;

A – поправка за висоту;

γ_0 – довідкове значення прискорення сили тяжіння.

До відомого алгоритму визначення аномалії Δg прискорення сили тяжіння (4) необхідно врахувати ще поправку на вплив похибки від переносної (відносно гравіметра) кутової швидкості обертання Землі.

Похибки від переносної кутової швидкості ω_z визначаються [7]:

$$\Delta_3 = K_{III} \omega_3; \quad (1.5)$$

$$\delta_3 = \frac{\Delta_3}{\alpha_{кор}} \cdot 100\%, \quad (1.6)$$

де K_{III} – коефіцієнт передачі гравіметра; ω_3 – швидкість обертання Землі; $\alpha_{кор}$ – корисний сигнал гравіметра.

Знайдемо аналітичний вираз похибки Δ_3 . Для цього врахуємо, що вертикальна складова переносної кутової швидкості головної осі зумовлена обертанням Землі і власним рухом літака:

$$\omega_z = \omega_3 \sin \varphi + \frac{v_y}{r} \operatorname{tg} \varphi; \quad (1.7)$$

$$v_y = r \dot{\lambda} \cos \varphi; \quad (1.8)$$

$$\frac{v_y}{r} \operatorname{tg} \varphi = \dot{\lambda} \sin \varphi, \quad (1.9)$$

де v_y – східна складова шляхової швидкості літака; r – геоцентричний радіус Землі; $\dot{\lambda}$ – швидкість зміни довготи.

Із урахуванням (1.9) можна представити вираз (1.7) у вигляді:

$$\omega_z = (\omega_3 + \dot{\lambda}) \sin \varphi. \quad (1.10)$$

У загальному випадку руху літака ще повертається навколо осі Oz з кутовою швидкістю \dot{k} , тоді

$$\omega_z = (\omega_3 + \dot{\lambda}) \sin \varphi + \dot{k}, \quad (1.11)$$

де k – курсовий кут у площині горизонту, відлічуваний за рухом годинникової стрілки від напрямку на північ до повздовжньої осі об'єкта.

З урахуванням (1.11) запишемо вираз (1.5) у вигляді:

$$\Delta_3 = K_{\text{III}}[(\omega_3 + \dot{\lambda}) \sin \varphi + \dot{k}]. \quad (1.12)$$

Відповідне середнє значення абсолютної похибки $\bar{\Delta}_3$ становить:

$$(t_2 - t_1)\bar{\Delta}_3 = K_{\text{III}}[k(t_2) - k(t_1)] + K_{\text{III}} \int_{t_1}^{t_2} \omega_3 \sin \varphi(t) dt + K_{\text{III}} \int_{t_1}^{t_2} \dot{\lambda}(t) \sin \varphi(t) dt, \quad (1.13)$$

де $(t_2 - t_1)$ – інтервал усереднення.

Отже, БЦОМ 4 буде визначати значення аномалії Δg прискорення сили тяжіння за наступним алгоритмом:

$$\Delta g = f_z + \Delta_3 + E + A - \gamma_0. \quad (1.14)$$

Таким чином, двоканальний п'єзогравіметр (ДПГ) авіаційної гравіметричної системи забезпечує суттєве підвищення точності вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння.

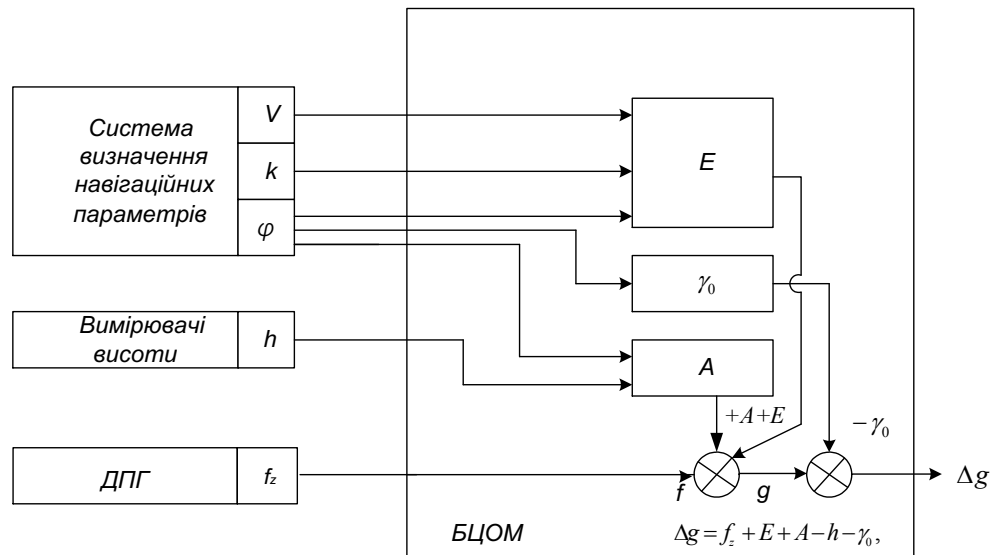


Рис.1.1. Функціональна схема автоматизованої АГС із ДПГ

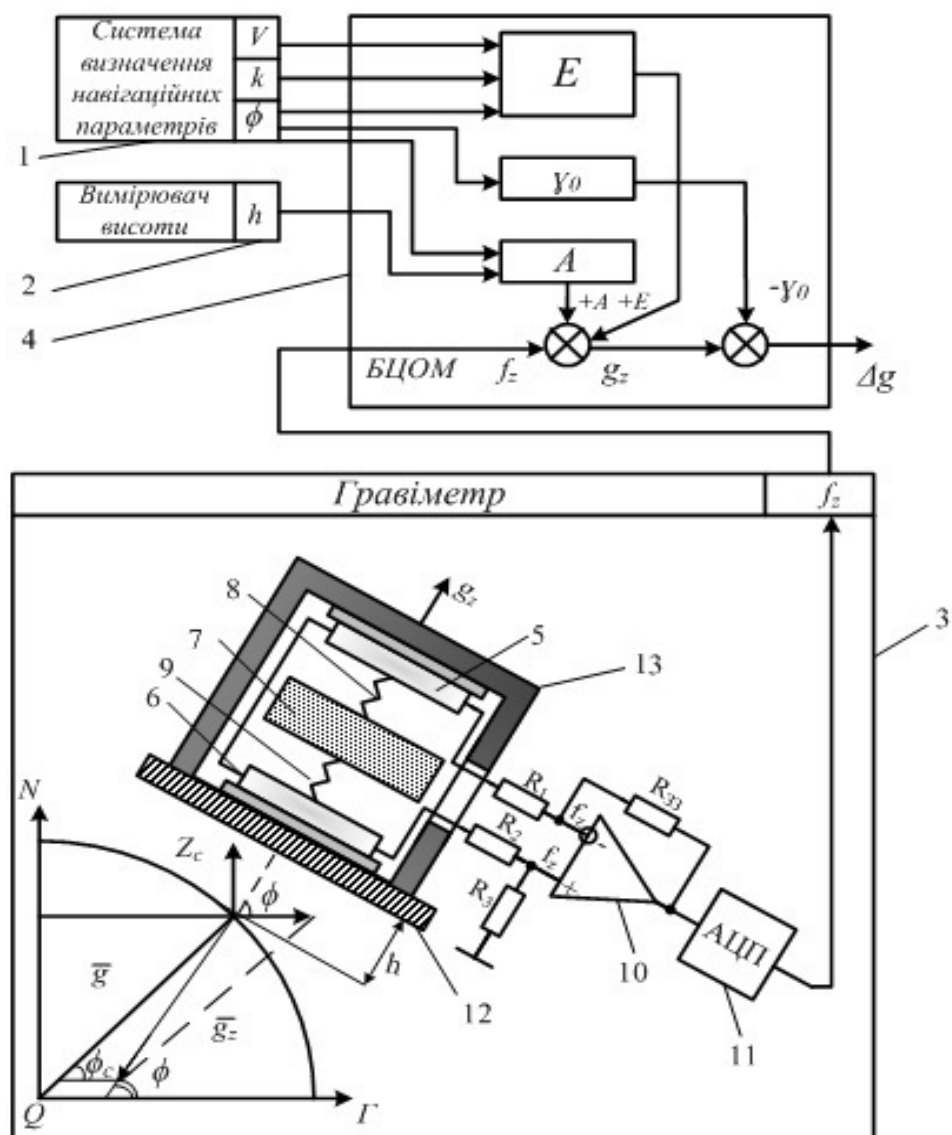


Рис. 1.2. Двоканальний п'єзоелектричний гравіметр АГС

1.5. Висновки до розділу 1

1.5.1. На основі сучасних даних, проведено аналіз гравіметрів, які застосовуються у теперішній час при проведенні гравіметричних робіт, і виявлено їх основні недоліки:

- 1) низька точність вимірювання (2-10 мГал);
- 2) обов'язкова необхідність застосування процесу фільтрації вихідного сигналу гравіметра АГС;
- 3) нестабільність статичного передатного коефіцієнта гравіметра АГС, спричинена змінами властивостей конструктивних елементів;
- 4) невисока швидкодія та відсутність можливості оперативної обробки інформації та інші.

1.5.2. Визначено сучасні вимоги до точності гравіметрів АГС. Для суттєвого покращення характеристик точності АГС наразі критичним є досягнення точності гравіметра АГС величиною у 1мГал.

1.5.3. Запропоновано для дослідження двоканальний п'єзоелектричний гравіметр АГС, особливості якого дозволяють подолати всі вищезгадані недоліки існуючих гравіметрів АГС.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

ДВОКАНАЛЬНОГО П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ГРАВІМЕТРА

2.1. Спрощена математична модель двоканального п'єзоелектричного гравіметра

Новий двоканальний п'єзогравіметр, містить пристрій обчислення вихідного сигналу гравіметра та чутливий елемент, що містить п'єзопластини (рис. 2.1). Чутливий елемент виконано з двома каналами, в кожному з яких встановлено по одному п'єзоелементу, що є ідентичними і виконані у вигляді п'єзопластин та інерційної маси, що закріплені одне на одному, причому п'єзоелемент одного каналу розташовано п'єзопластинами вниз, а п'єзоелемент іншого каналу розташовано п'єзопластинами вгору, причому виходи п'єзопластин обох каналів з'єднані з входами суматора, вихід якого з'єднаний із входом пристрою обчислення вихідного сигналу гравіметра, щоб забезпечити підвищення точності вимірювань гравітаційного прискорення.

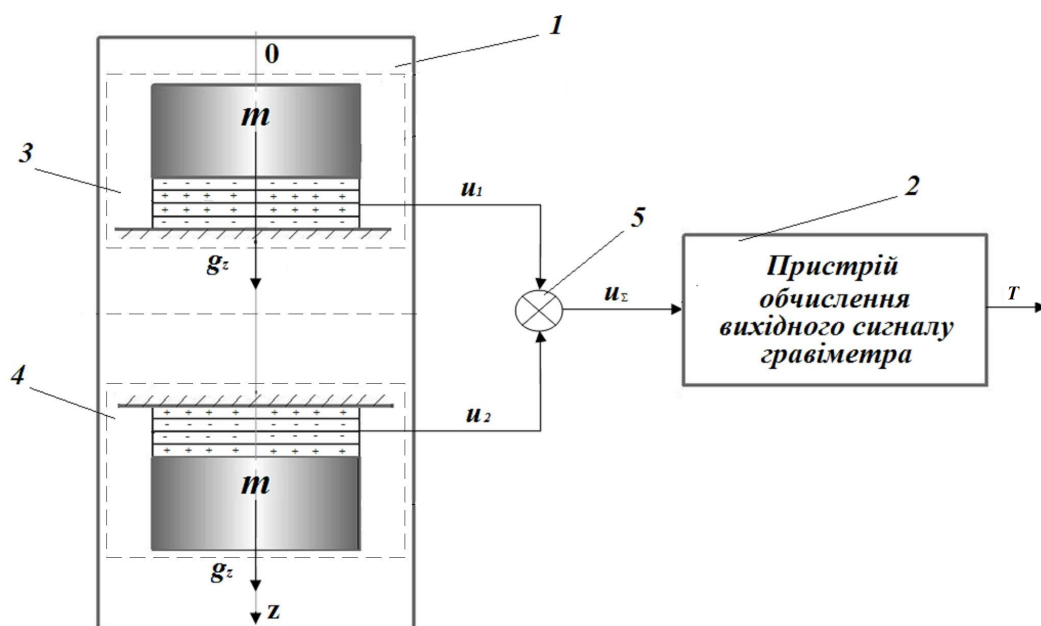


Рис. 2.1. Двоканальний п'єзоелектричний гравіметр

Підвищення точності вимірювання у двоканальному п'єзографіметрі забезпечується за рахунок того, що створено другий канал вимірювання. Для цього чутливий елемент виконано з двома каналами. П'єзоелемент одного каналу, що встановлений інерційною масою на п'єзопластинах, працює на стиснення. Ідентичний йому п'єзоелемент іншого каналу, що встановлений інерційною масою під п'єзопластинами, працює на розтяг. Вихідні електричні сигнали п'єзопластин обох каналів сумуються у суматорі. Результуючий корисний електричний сигнал буде пропорційним подвоєному сигналу гравітаційного прискорення. Отже, завдяки використанню додатково введеного другого каналу вимірювання, забезпечується відсутність у вихідному сигналі нового двоканального п'єзографіметра сигналів похибок від впливу вертикального прискорення, від залишкової неідентичності конструкцій однакових п'єзопластин та мас, від впливу зміни температури, вологості та тиску зовнішнього середовища (тобто інструментальних похибок), які можуть бути значними.

Таким чином, запропонований двоканальний п'єзографіметр забезпечує суттєве підвищення точності вимірювання гравітаційного прискорення.

Принцип дії даного гравіметра пояснюється на рис.2.1, де зображено структурну схему двоканального п'єзографіметра.

У двоканальному п'єзографіметрі чутливий елемент 1 виконано з двома каналами, в кожному з яких встановлено по одному п'єзоелементу. П'єзоелементи обох каналів є ідентичними і виконані у вигляді п'єзопластин та інерційної маси, що закріплені одне на одному. П'єзоелемент 3 одного каналу розташовано п'єзопластинами вниз, а п'єзоелемент 4 іншого каналу розташовано п'єзопластинами вгору. Виходи п'єзопластин обох каналів з'єднані з входами суматора 5, вихід якого з'єднаний із входом пристрою 2 обчислення вихідного сигналу гравіметра.

Двоканальний п'єзографіметр працює наступним чином.

На п'єзоелементи обох каналів діє гравітаційне прискорення g_z , вертикальне прискорення $\Delta\ddot{z}$ літака та інструментальні похибки Δi від впливу залишкової неідентичності конструкцій однакових п'єзопластин та мас, від впливу зміни температури, вологості та тиску зовнішнього середовища. Якщо спроектувати всі ці впливи на вимірювальну вісь Oz гравіметра-винаходу та врахувати те, що п'єзоелемент 3 одного каналу працює на стиснення, а п'єзоелемент 4 іншого каналу – на розтяг, то отримаємо [7]:

$$\begin{aligned} u_1 &= k(mg_z + m\Delta\ddot{z} + \Delta i), \\ u_2 &= k(mg_z - m\Delta\ddot{z} - \Delta i), \end{aligned} \quad (2.1)$$

де u_1 – вихідний електричний сигнал п'єзопластин одного каналу;

u_2 – вихідний електричний сигнал п'єзопластин іншого каналу;

m – вага інерційної маси у кожному каналі;

k – п'єзоелектрична стала.

Вихідні електричні сигнали u_1 та u_2 п'єзопластин обох каналів сумуються у суматорі 5:

$$u_\Sigma = u_1 + u_2 = 2kmg_z, \quad (2.2)$$

де u_Σ – вихідний сигнал суматора 5.

Вихідний сигнал u_Σ суматора 5 подається у пристрій 2 обчислення вихідного сигналу гравіметра, де він обчислюється за певний інтервал часу. У кінцевому результаті отримуємо вихідний сигнал T пристрою 2 обчислення вихідного сигналу гравіметра, який містить подвоєний сигнал гравітаційного прискорення. У ньому повністю відсутні такі похибки вимірювань, які спричинені впливом вертикального прискорення $\Delta\ddot{z}$ та інструментальних похибок Δi . Отже, точність двоканального п'єзогравіметра буде значно вищою.

Для суттєвого покращення точності АГС запропоновано новий двоканальний п'єзогравіметр. Показано, що реальним є досягнення точності п'єзогравіметра АГС величиною у 1мГал шляхом компенсації похибок від впливу вертикального прискорення (у 10^3 раз перевищує корисний сигнал) та інструментальних похибок від залишкової неідентичності конструкцій однакових п'єзопластин та мас, від впливу зміни температури, вологості та тиску зовнішнього середовища.

2.2. Математична та механічна моделі двоканального п'єзоелектричного гравіметра

Вимушені коливання відбуваються у коливальній системі ДПГ при дії на його чутливу масу прискорення сили тяжіння.

Коливальна система ДПГ включає у себе наступні елементи: інерційна маса (m), елемент жорсткості (k) та демпфуючий елемент (n). У якості демпфіруючого елемента виступає повітря, яке створює опір рухові ІМ. Елемент жорсткості характеризується пружними властивостями ПЕ [60, 65].

Запропонована коливальна система є справедливою за певних умов:

- рух ІМ розглядається в інерціальній системі відліку і відбувається лише в одному напрямку – вздовж осі z - z , перпендикулярної площині встановлення ПГ;
- опора, ІМ та інші складові ПГ є недемпфированими;
- маса пружного елемента набагато менша за ІМ;
- у межах можливих коливань, сила пружності пропорційна деформації пружного елемента;
- маса ЧЕ, коефіцієнт пружності та демпфірування є незмінними у часі.

Для одного чутливого елемента ДПГ рух ІМ із прискоренням g_z забезпечує сила, пов'язана з ним згідно з другим законом Ньютона:

$$G = mg_z, \quad (2.3)$$

де G – сила, яка діє на ІМ; m – величина ІМ.

Під час руху ІМ на неї діють також сила пружності ПЕ, сила опору руху та інерційна сила від дії вертикального прискорення ЛА.

Сила пружності ПЕ, відповідно до закону Гука, дорівнює:

$$F_{np} = -\kappa x, \quad (2.4)$$

де F_{np} – сила пружності ПЕ; κ – коефіцієнт пружності, який залежить від властивостей ПЕ; x – зміщення ІМ ПГ відносно нульового положення.

Сила опору руху ІМ:

$$F_{op} = -n \frac{dx}{dt}, \quad (2.5)$$

де F_{op} – сила опору руху ІМ; n – коефіцієнт опору (затухання).

З урахуванням (3), (4) і (5) отримаємо:

$$mg_z = -n \frac{dx}{dt} - \kappa x. \quad (2.6)$$

Кінцеве рівняння руху ПГ із врахування інерційної сили $F_i = m \frac{d^2 x}{dt^2}$ матиме вигляд:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + n \frac{dx}{dt} + \kappa x = -mg_z. \quad (2.7)$$

Через інерційність конструкції ПГ, двома першими складовими у наступному будемо нехтувати.

Рівняння руху ПГ в умовах установки на Землі, буде $g_z = -\frac{\kappa}{m} x$. В умовах установки ПГ на ЛА складову $m \frac{d^2 x}{dt^2}$ треба враховувати.

Аналогічно для другого чутливого елемента ДПГ

Кінцеве рівняння руху матиме вигляд:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + n \frac{dx}{dt} + \kappa x = -mg_z. \quad (2.8)$$

Через інерційність конструкції ПГ, двома першими складовими у наступному будемо нехтувати, як і у першому випадку.

Рівняння руху другого ЧЕ ДПГ в умовах установки на Землі, буде

$$g_z = -\frac{\kappa}{m} x.$$

Для двоканального п'єзогравіметра в умовах установки на Землі

$$g_z = -2 \frac{\kappa}{m} x.$$

В умовах установки ДПГ на ЛА складову $m \frac{d^2 x}{dt^2}$ треба враховувати.

Застосувавши до виразу (2.8) перетворення Лапласа отримаємо:

$$mp^2 x(p) + npx(p) + \kappa x(p) = -2mg_z(p), \quad (2.9)$$

де $x(p)$ – зображення по Лапласу зміщення ІМ; $g_z(p)$ – зображення по Лапласу ПСТ уздовж осі чутливості ДПГ.

Знаходимо передатну функцію $W(p)$ ДПГ по каналу ПСТ–зміщення ІМ:

$$W(p) = \frac{x(p)}{g_z(p)} = \frac{-2m}{mp^2 + np + \kappa}. \quad (2.10)$$

Оскільки вихідна напруга ДПГ прямо пропорційна зміщенню ІМ, використовуючи вираз (2.10), можна записати передатну функцію ДПГ по каналу ПСТ – вихідна напруга:

$$W_{\Pi\Gamma}(p) = \frac{2K_{\Pi\Gamma}}{T_1 p^2 + T_2 p + 1}, \quad (2.11)$$

де $W_{\Pi\Gamma}(p)$ – передатна функція ДПГ по каналу ПСТ–вихідна напруга; $K_{\Pi\Gamma}$ – статичний коефіцієнт передачі ДПГ; T_1 і T_2 – коефіцієнти, що визначають постійні часу об’єкта другого порядку.

Якщо розділити рівняння руху ДПГ (2.8) на m , то отримаємо [13]:

$$\ddot{x} + 2 \cdot \xi \omega_0 \dot{x} + \omega_0^2 x = -2g_z, \quad (2.12)$$

де ξ – коефіцієнт демпфування; ω_0 – власна частота ДПГ.

Як показано у [52, 59] коефіцієнт демпфірування ДПГ (п’єзоакселерометра) є нелінійною функцією, яка залежить від пружних та п’єзоелектричних властивостей ПЕ.

Перепишемо рівняння (2.12) у вигляді [2]:

$$m\ddot{x} + \dot{x}[2n - L \sin(\omega t + \varepsilon)] + \omega_0^2 x = N \sin \omega t, \quad (2.13)$$

де $L = mw_a$, $N = mw_b$ – параметри вібрації; w_a , w_b – амплітуди вібраційних прискорень. Вважаємо, що $M(t) = 2n - L \sin(\omega t + \varepsilon)$, а $D(t) = \omega_0^2$, тоді

$$\ddot{x} + \dot{x}M(t) + D(t)x = 0, \quad (2.14)$$

де $M(t)$ та $D(t)$ – Т-періодичні функції.

Рівняння вигляду (2.14) без зміни характеристик показників можна звести до аналогічного, де $M(t) = \text{const}$.

Нехай

$$\int_0^t M(t_1) dt_1 = \Psi t + M_1(t), \quad (2.15)$$

$$\text{де } \Psi = 2n; \quad M(t_1) = \int_0^t (M(t_1) - \Psi) dt = \frac{L}{\omega} \cos(\omega t + \varepsilon).$$

Змінюючи

$$x = e^{-\frac{1}{2}M_1(t)} x' = e^{-\frac{1}{2}\frac{L}{\omega} \cos(\omega t + \varepsilon)} x', \quad (2.16)$$

дістанемо

$$\ddot{x}' + 2n\dot{x}' + F(t)x' = 0, \quad (2.17)$$

в якому

$$F(t) = \omega_0^2 + v_0 \sin(\omega t + e + \sigma_8), \quad (2.18)$$

$$\text{де } \sigma_8 = \arctg \frac{\omega}{2n}; \quad v_0 = \frac{L\sqrt{\omega + 4n^2}}{2}.$$

Вираз (2.18) із урахуванням (2.13) і (2.17) можна записати у вигляді

$$\ddot{x}' + 2n\dot{x}' + [\omega_0^2 + v_0 \sin(\omega t + e + \sigma_8)]x' = N \sin \omega t, \quad (2.19)$$

або з урахуванням параметрів: $m = 0,01 \text{ кг}$, $\varepsilon + \sigma_8 = 0$:

$$\ddot{x}' + 2\xi\omega_0\dot{x}' + (\omega_0^2 + v_1 w_b \sin \omega t)x' = 0,01w_a \sin \omega t, \quad (2.20)$$

$$\text{де } v_1 = \frac{v_0}{w_b}.$$

Отже, отримано рівняння (2.20) типу Матьє-Хілла, яке є зручним для моделювання на ЕОМ.

У рівнянні (2.8) складовими прискорення та швидкості будемо у подальшому нехтувати, зважаючи на інерційність ДПГ. Тоді рівняння руху АГС із ДПГ матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \kappa x = g_z - \frac{v^2}{r} + 2e \frac{v^2}{r} \left[1 - 2 \cos^2 \varphi \cdot \left(1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] - 2\omega_3 v \sin k \cos \varphi + \\ + 2\dot{h} \frac{e}{r} v \cos k \sin 2\varphi - 2 \frac{\gamma_0 h}{r} - \omega_3^2 h \cos^2 \varphi, \end{aligned} \quad (2.21)$$

де g_z – ПСТ вздовж осі чутливості ДПГ; v – швидкість ЛА; r – радіус місцезнаходження ЛА; e – стиск еліпсоїда; φ – географічна широта; k – курс ЛА; ω_3 – кутова швидкість обертання Землі; h – висота ЛА над еліпсоїдом; \dot{h} – вертикальна швидкість ЛА.

2.3. Способи закріплення п'єзоелемента у конструкції ДПГ

У розділі 1 обрано конструкцію ЧЕ нового ДПГ, який працює на основі деформації стиснення-розтягування. Даний вибір обґрунтовано значними перевагами ЧЕ, що працюють на стиснення-розтягування, перед ЧЕ (інерційною масою та п'єзоелементом) на “згин” чи “здвиг” для вимірювання ПСТ: високий коефіцієнт перетворення; мала чутливість до сторонніх впливів, включаючи поперечні коливання; простота та технологічність конструкції; висока часова стабільність метрологічних характеристик [14].

Існує декілька способів розміщення ПЕ в конструкціях ЧЕ, що працюють на основі деформації стиснення-розтягування, найпростіші з яких зображені на рис. 2.2.

Канонічна схема (рис. 2.2, а) складається із одного дискового ПЕ 1, розташованого між основою 2 й ІМ 3. У даній схемі можливий тільки неізолюваний від корпусу метод виведення сигналу. Так як центри мас ПЕ та ІМ не збігаються із центром інерції ПГ, така конструкція є не центрованою, що сприяє виникненню чутливості до поперечних коливань [15].

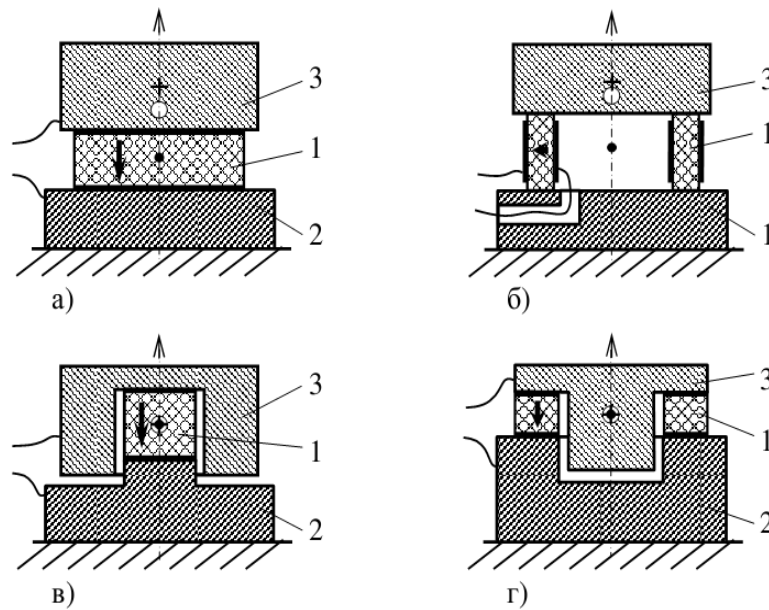


Рис. 2.2. Схеми розміщення ПЕ у конструкції ПГ, що працюють на основі деформації стиснення-розтягування: 1 – ПЕ; 2 – основа; 3 – ІМ (складові елементи, з'єднані за допомогою клею)

Основні переваги даної конструкції: простота виготовлення і можливість досягнення високої резонансної частоти ПГ.

Циліндричний ПЕ 1 із радіальним напрямом поляризації (робочий n' єзомодуль d_{31}) (рис. 2.2, б). Розташування електродів на поверхнях ПЕ дає можливість без використання додаткових ізоляторів виконати симетричне виведення сигналу, що сприяє підвищенню надійності ПГ. Вибір висоти, зовнішнього і внутрішнього діаметрів ПЕ дозволяє оптимізувати вибір значення коефіцієнта передачі ПГ і його резонансної частоти. Дана конструкція також є нецентрованою.

У центрованих конструкціях із зовнішнім (рис. 2.2, в) і внутрішнім (рис. 2.2, г) розташуванням ІМ центри мас ПЕ 1 і ІМ 3 співпадають із центром інерції ПГ, що сприяє зниженню чутливості до поперечних коливань.

Загальні недоліки усіх клеєних схем: їх невисока міцність і надійність. Крім того, клейові з'єднання негативно впливають на температурну стабільність метрологічних характеристик ПГ.

Переваги: простота їх конструкції та малі габаритні розміри.

У вищезгаданих схемах з'єднання складових елементів може відбуватись пайкою або зварюванням (як альтернатива склеюванню).

Схеми розміщення ЧЕ ПГ із пружним затисненням елементів (рис. 2.3).

ПГ із центральним затисненням (рис. 2.3, а) містить два дискових ПЕ 1 з осьовим отвором, розташовані між основою 2 та ІМ 3 і стягнуті різьбовою шпилькою 4 через пружину 5. Наявність пружини стабілізує зусилля затиснення за рахунок компенсації теплового розширення елементів конструкції і деформацій різьбових з'єднань. Знімання електричного сигналу здійснюється через тонку металеву прокладку 6 між п'єзоелементами. Наявність декількох ПЕ забезпечує підвищення ємності і коефіцієнта перетворення по заряду ПГ та не вимагає розміщення додаткового ізолятора між ПЕ й ІМ. Дана конструкція є нецентрованою та має неізольоване від корпусу виведення сигналу.

У схемі, зображеній на рис. 2.3, б, центральне затиснення здійснюється *гвинтом 7* без використання окремого пружного елемента. Конструкція додатково містить два ізолятора 8, які забезпечують реалізацію ізольованого від корпусу виведення сигналу. Дана конструкція, як і попередня, є нецентрованою. Відсутність пружини дозволяє збільшити зусилля затиснення елементів ПГ. Однак, зростання жорсткості затиснення може призвести до зниження коефіцієнта передачі ПГ на 20 - 30%.

Розглянуті схеми розміщення ЧЕ ПГ з центральним пружним затисненням характеризуються досить високою стабільністю метрологічних характеристик, міцністю, надійністю і технологічністю.

До іншого різновиду схеми розміщення ЧЕ ПГ з пружним затисненням відносяться *конструкції, виконані за схемою тандем-датчика* [14]. Особливість роботи даної схеми полягає в одночасній, але протилежній за знаком, деформації ПЕ. Нелінійності вихідних сигналів, що виникають при стисненні і розтягуванні ПЕ, взаємно компенсуються (рис. 2.3, в, г).

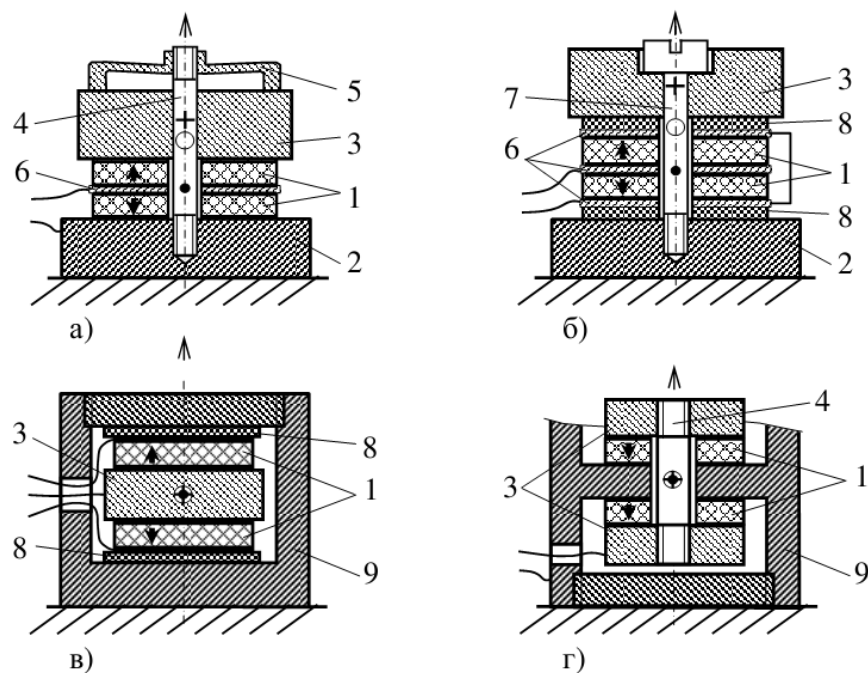


Рис. 2.3. Схеми розміщення ПЕ у конструкції ПГ, що працюють на основі деформації стиснення-розтягування: 1 – ПЕ; 2 – основа; 3 – ІМ; 4 – шпилька; 5 – пружина; 6 – прокладка; 7 – гвинт; 8 – ізолятор; 9 – корпус (складові елементи, з'єднані за допомогою гвинта чи шпильки)

У реальних умовах не завжди можливо підібрати пари ПЕ із абсолютно однаковими характеристиками. Крім того, механічні напруги у ПЕ дещо відрізняються, так як останні закріплені на різних ділянках корпусу ПГ та мають різні жорсткості. Дані недоліки не дозволяють повною мірою здійснити компенсацію нелінійності вихідних сигналів.

Порівняльні характеристики згаданих конструктивних схем наведені у табл.2.1.

Характеристика конструктивних схем ПГ

№	Тип конструкції	Переваги	Недоліки
1	Нецентрована із клеєвим з'єднанням	Простота конструкції, можливість реалізації високої резонансної частоти	Низька чутливість; піддається впливові поперечних коливань; температурна нестабільність метрологічних характеристик
2	Центрована із клеєвим з'єднанням	Стійкість до впливу поперечних коливань	Стійкість до впливу зовнішніх електромагнітних полів; низька точність; малий діапазон вимірювання; температурна нестабільність
3	Нецентрована із затисненням за допомогою шпильки	Висока чутливість, високий коефіцієнт перетворення, стабільність метрологічних характеристик	Нестабільність коефіцієнта підсилення; залежність від властивостей гвинта
4	Нецентрована із затисненням за допомогою гвинта	Стабільність метрологічних характеристик; стійкість до впливу поперечних коливань	Залежність від властивостей гвинта

5	Схема тандем-датчик	Стійкість до впливу зовнішніх магнітних полів, температурна стійкість	Неможливість підібрати пари ПЕ із абсолютно однаковими характеристиками
---	---------------------	---	---

Як бачимо із табл. 2.1, кожна конструктивна схема має як свої переваги, так і недоліки. Тому запропоновано у конструкції нового ПГ використовувати наступну схему розміщення ЧЕ (рис. 2.4).

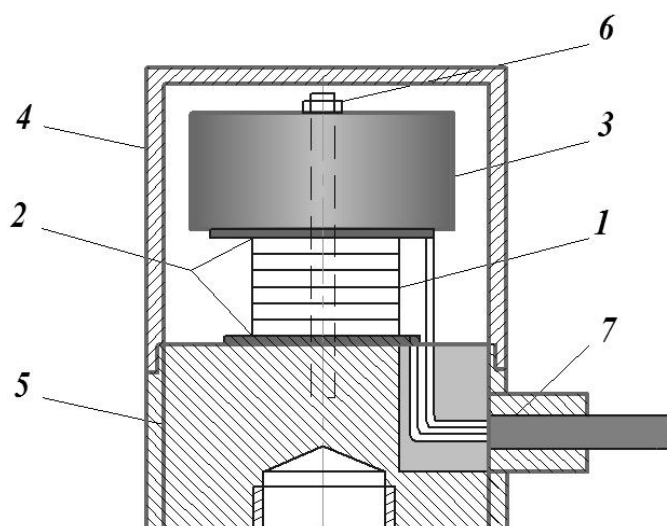


Рис.2.4. Конструкція ПГ: 1 – ПЕ; 2 – ізолятори; 3 – ІМ; 4 – основа;
5 – герметичний корпус; 6 – гвинт; 7 – вивідний кабель

Як бачимо із рис. 2.4, конструкція нового ПГ є не центрованою. Чутливий елемент ПГ АГС складається із п'єзоелектричного елемента 1, що працює на основі деформації стиснення-розтягування, з ізоляторами 2 на торцях, і інерційної маси 3. З метою підвищення надійності та міцності конструкції, ЧЕ пружно притиснений до основи 4 гвинтом 6. ПГ за допомогою кабелю 7 з'єднаний із операційним підсилювачем.

Конструкція ПГ була обрана із наступних міркувань. Оскільки необхідно забезпечити максимальну чутливість ПГ, то конструкція має бути не

центрованою (табл.2.1). Так як у якості ЧЕ буде використовуватись п'єзопакет, а не біморфний п'єзоелемент, то його затиснення має бути максимально пружним, що можна реалізувати лише за допомогою гвинта. Таке затиснення забезпечує стійкість ПЕ до впливу перевантажень та максимальну його пружність, що також призводить до підвищення надійності ПГ. Схема ПГ передбачає ізольоване виведення сигналу через кабель, що максимально ліквідує вплив на вихідний сигнал ПГ зовнішніх електромагнітних полів.

2.4. Аналіз та вибір п'єзоматеріалів для чутливого елемента п'єзоелектричного гравіметра

П'єзоелектричні явища вперше детально вивчали французькі фізики брати П'єр та Жак Кюрі у 1880 р. на кристалі кварцу. Згодом п'єзоелектричні властивості було виявлено більш ніж у 1500 речовин. Фізичну природу п'єзоефекту краще за все розглядати саме на прикладі найбільш відомого п'єзоелектричного кристалу – кварцу (SiO_2).

Використання на практиці фізичного явища прямого п'єзоефекту розпочалось з 1917 р., коли французький математик і фізик Поль Ланжевен винайшов ультразвуковий ехолокаційний прилад для виявлення підводних човнів. Згодом з'явилися перші розробки п'єзоелектричних пристроїв звукозапису, датчиків для вимірювання вібрацій та прискорень тощо. На сьогоднішній час п'єзоперетворювачі використовують для визначення внутрішніх дефектів твердих, вимірювання швидкості ультразвуку, а також у медицині, машинобудуванні, геофізиці, геодинаміці та гравіметрії.

П'єзоелектричний ефект полягає в тому, що у кристалах деяких діелектриків, при дії механічних сил, відбувається поділ (зсув) електричних зарядів так, що одна їх частина заряджається позитивно, а інша – негативно.

П'єзоелектриками є лише кристалічні речовини, у яких обов'язково виділені напрямки, вздовж яких направлений вектор поляризації при деформації і які можуть бути як моно- так і полікристалічними.

До першої групи відносяться кварц, турмалін, хлорид натрію, сегнетова сіль, титанат барію і багато інших речовин. До другої – штучно створені кристали п'єзокераміки.

Окрім запропонованих монокристалів, які є природними хімічними елементами, можна використовувати і штучно створені полікристали. Штучний п'єзоелектричний матеріал за своїми фізичними властивостями є напівкристалічним сегнетоелектриком – являє собою хімічну сполуку чи твердий розчин.

П'єзоелектрична кераміка являє собою твердий, хімічно інертний матеріал, зовсім нечутливий до вологості. Найбільше поширення отримала група п'єзокерамічних матеріалів типу ЦТС (титану-цирконату свинцю). Разом з тим, є відомою кераміка на основі титанату барію і титанату свинцю.

В останні роки розробляються нові п'єзокерамічні матеріали з більш високими технічними характеристиками і широкими можливостями використання.

Робота п'єзогравімета (ПГ), в основному, залежить від характеристик та параметрів п'єзоелемента (ПЕ) гравіметра, бо він є його основною складовою.

До основних параметрів п'єзоелектричних матеріалів відносяться:

- коефіцієнт електромеханічного зв'язку (K_p);
- відносна діелектрична проникливість (ϵ);
- густина (ρ);
- п'єзомодуль (d_{ij});
- модуль Юнга (Y);
- механічна добротність (Q_M);
- водопоглинання, %;
- температура точки Кюрі (T_K) та інші.

У табл.2.2. представлені основні параметри найпоширеніших п'єзоелектричних матеріалів. Із точки зору повноти використання вхідної енергії, яка характеризується коефіцієнтом електромеханічного зв'язку, найкращим матеріалом є сегнетова сіль, а найгіршим – кварц. Однак, низькі температурні властивості сегнетової солі не дозволяють на практиці реалізовувати її високі електромеханічні характеристики.

Усі штучно створені п'єзокерамічні матеріали, як видно із таблиці, виділяються високими діелектричною проникливістю та коефіцієнтом електромеханічного зв'язку. Але кераміка має малий модуль пружності, що унеможливорює її використання в умовах експлуатації ПГ на борту літальних апаратах (ЛА).

Проведено аналіз основних параметрів п'єзоелектричних матеріалів та обрано найоптимальніший із них для конструкції чутливого (ЧЕ) розробляемого ПГ, а саме – ніобат літію. Він є сегнетоелектриком з температурою Кюрі $\sim 1210\text{ }^{\circ}\text{C}$ і величиною спонтанної поляризації $50\text{-}80\text{ мкКл /см}^2$ при 300 К . Ніобат літію (LiNbO_3) – хімічна сполука, змішаний оксид ніобію, літію, безбарвні кристали з ромбоєдричною структурою ($a = 0547\text{ нм}$, $\gamma = 53,72\text{ }^{\circ}$, просторова група $R3c$). Не розчинний у воді. Не взаємодіє з кислотами крім фтористоводородної кислоти.

Основні параметри п'єзоелектричних матеріалів

№ п / п	Матеріал	Коеф. ел-механ. зв'язку K_p	Відносна діелектр. проникл., ϵ ,	Густина, ρ , 10^3 кг/м^3	П'єзомодуль d_{ij} , 10^{-12} Кл/Н	Водопоглинання, %	Модуль Юнга, Y , $\text{Н/м}^2 \cdot 10^9$	Допустима темпер, $T_{\text{доп.}}$, $^{\circ}\text{C}$	Механічна добротність, Q_M	Тангенс кута діелектричних втрат, $\text{tg} \times 10^2$	
1	Кварц	0.095	3.50–4.50	2.65	231	–	80	550	$>10^4$	<0.5	
2	Турмалін	0.10	6.60	3.10	190	–	160	–	$>10^2$	<10	
3	Ніобат літію	0.32	28.60	4.64	1620	–	95	1142	$<10^5$	–	
4	Дигідрофосфат амонію	0.28	15.30	1.80	24	–	19.3	125	$>10^2$	<10	
5	Сульфат літію	0.37	10.30	2.05	16	0.34	46	75	$>10^2$	<10	
6	Сегнетова сіль	0.67	250	1.77	27	0.63	19.3	45	–	>5	
7	Титанат барія, ТБ-1	0.40	1500	5.30	45	0.20	100	120	400	2–3	
8	Титанат барія- кальцю, ТБК-3	0.46	1180	5.40	45	0.20	120	105	450	3–4	
9	Титан- цирконат свинцю	P Z T- 8	0.47	1000	7.60	40	–	61	255	1000	0.4–0.7
10		Ц Т С- 23	0.50	1100	7.40	100	0.09	0.85	285	50	0.75 – 2.0

Отримують LiNbO_3 взаємодією Li_2CO_3 з Nb_2O_5 при 1050...1100 °С. Монокристали вирощують методом Чохральського. Його кристалічна структура не має центральної симетрії і тому ніобат літію є сегнетоелектриком, і демонструє ефект Поккельса – п'єзоелектричний ефект. Саме він є найоптимальнішим матеріалом для ЧЕ нового ПГ. Незважаючи на мале значення п'єзомодуля та відносної діелектричної проникливості у порівняння із п'єзокерамікою, ніобат літію має високу стійкість до зміни зовнішніх температур та тисків, високий коефіцієнт електромеханічного зв'язку та стабільні п'єзоелектричні властивості, що є важливим безпосередньо для конструкції ПГ.

Провівши аналіз основних параметрів п'єзоелектричних матеріалів обрано найоптимальніший із них для конструкції ЧЕ нового ПГ, а саме – ніобат літію.

Після того, як обрано необхідний п'єзоматеріал для ЧЕ нового ПГ, треба ідентифікувати, власне, конструкцію ПЕ. П'єзоелектричні пластини, зазвичай, об'єднують у багатошарові п'єзопакети. Пакетна конструкція представляє собою набір із окремих п'єзопластин із металізованими поверхнями, кількість яких визначається необхідним діапазоном переміщень.

2.5. Розрахунок основних електричних параметрів п'єзоелектричного гравіметра

Визначимо напругу між пластинами п'єзоелектричного ЧЕ при дії сили $F_x=9.81\text{Н}$ на площу ПЕ $S=5\text{см}^2=5\cdot10^{-4}\text{м}^2$ і висоті ПЕ $h_n=0.5\text{ см}=0.005\text{ м}$ ($\epsilon_{\text{вак}}=8.85\cdot10^{-12}\text{ Ф/м}$ – діелектрична постійна вакууму, $\epsilon_{\text{кв}}=28.6$ – для ніобату літію).

Ємність ПЕ:

$$C_{\text{ПЕ}} = \frac{\epsilon S}{h_n} = \frac{\epsilon_{\text{к}} \cdot \epsilon_{\text{вак}} \cdot S}{h_n} = \frac{28.6 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-3}} = 25.33 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}. \quad (2.22)$$

Шукана необхідна напруга:

$$U = \frac{Q}{C_{ПЕ}} = \frac{d_{ij} F_x}{C_{ПЕ}} = \frac{16.20 \cdot 10^{-12} \cdot 9.81}{25.33 \cdot 10^{-12}} = 6.27 B. \quad (2.23)$$

У реальних умовах паралельно власній ємності C вмикаються також ємності вихідного кола підсилювача $C_{вх}$ та відвідного кабелю C_k . У цьому разі напруга, яку розвиває ПГ, зменшиться і буде рівною:

$$U = \frac{Q}{C + C_{BX} + C_K}. \quad (2.24)$$

Визначимо напругу, що знімається з п'єзоелемента, за даними, приведеними вище, якщо ємність схеми $C_{CX} = C_{вк} + C_k = 4 \cdot 10^{-12} \Phi$, тоді

$$U = \frac{16.20 \cdot 10^{-12} \cdot 9.81}{25.33 \cdot 10^{-12} + 4 \cdot 10^{-12}} = 5.41 B. \quad (2.25)$$

Наявність шунтуючої ємності приводить до значного зниження величини сигналу з п'єзоелемента.

Знайдемо напругу, що виникає між обкладинками ПЕ, розміри якого приведені на початку, при тиску F_x , що діє на його гранях, рівному $10 \text{ кГ/см}^2 = 9.81 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ для випадку $C_{cx} = 0$.

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{k F_x S_x}{C} = \frac{16.20 \cdot 10^{-12} \cdot 9.81 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{25.33 \cdot 10^{-12}} = 314 B. \quad (2.26)$$

Коефіцієнт перетворення по заряду:

$$K_3 = \frac{Qn}{g} = \frac{16.20 \cdot 10^{-12} \cdot 9.81 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{9.81} = 810 \text{ нКл} \cdot \text{с}^2 / \text{м}. \quad (2.27)$$

де Qn – вихідний заряд.

Коефіцієнт прямого п'єзоефекту 1-ї пластини:

$$Kn = \frac{SY d_{ij}}{l} = \frac{5 \cdot 10^{-4} \cdot 80 \cdot 10^9 \cdot 16.2 \cdot 10^{-12}}{2.2 \cdot 10^{-4}} = 2.95 \text{ Н / м.} \quad (2.28)$$

2.6. Визначення основних характеристик п'єзоелектричного гравіметра

1) Робочий діапазон прискорень ПГ

Зазвичай вважається, що значення вихідного сигналу ПГ (напруга U) має бути прямо пропорційним значенню діючого ПСТ. Однак, це може виконуватись лише у певному діапазоні прискорень. На рис.2.6 показана вихідна характеристика ПГ.

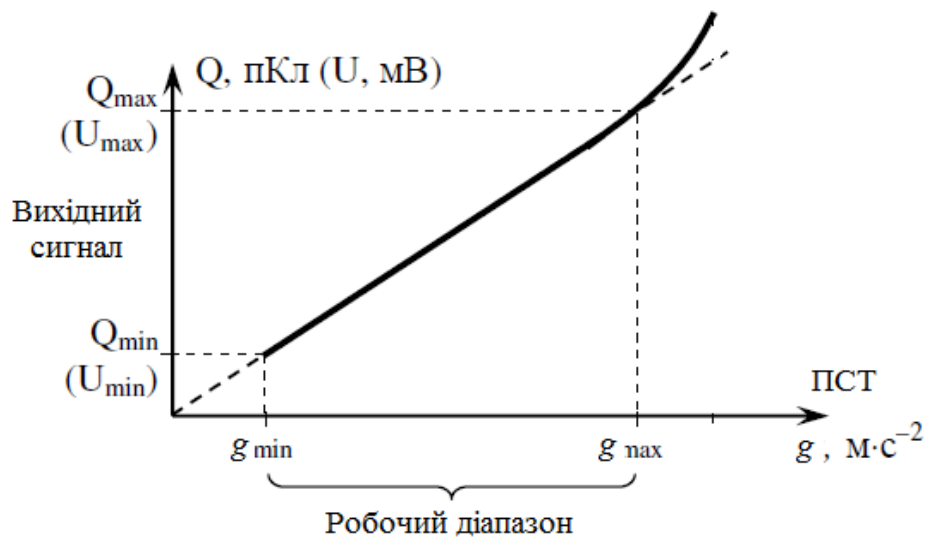


Рис. 2.5. Залежність вихідного сигналу ПГ від ПСТ

Нижня межа g_{min} робочого діапазону є умовним параметром, який визначається величиною вихідного сигналу U_{min} , який можна виміряти із необхідною точністю. Для ПГ ця межа має бути меншою за $1 \text{ мГал} = 10^{-5} \text{ м/с}^2$. Верхня межа g_{max} ПГ визначається ПСТ, за якого порушується лінійна залежність напруги від ПСТ. У новому ПГ верхня межа має бути на рівні 30 м/с^2 .

2) Власна частота ПГ

Частотні спектри сигналу, який відповідає ПСТ, і сигналу, який відповідає вертикальному прискоренню, є різними. Переважна частота першого сигналу дорівнює 0.00175 рад/с, переважна частота другого сигналу дорівнює 0.269 рад/с. Частота власних коливань п'єзопакета дорівнює 0.1 рад/с. Вона підібрана таким чином, щоб забезпечити відокремлення корисного сигналу ПСТ від завад (вертикального прискорення ЛА).

3) Частота резонансу ПГ

Резонанс – явище сильного зростання амплітуди вимушених коливань ПГ у разі, коли частота зовнішнього збурення збігається із власною частотою ПГ, яка дорівнює 0.1 рад/с⁻¹. Таке явище описується кривою Ленца, а величина частоти резонансу розраховується за формулою:

$$\omega_p = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}, \quad (2.29)$$

де ω_0 – власна частота ПГ; $n = \beta$ – коефіцієнт затухання ПГ.

Умова відсутності резонансу для ПГ:

$$\beta \geq \frac{\omega_0}{\sqrt{2}} \geq \frac{0.1}{\sqrt{2}} \geq 0.07. \quad (2.30)$$

Тоді

$$\omega_p = \sqrt{0.01 - 2 \cdot 0.07^2} = 0.014 \text{ рад/с}. \quad (2.31)$$

4) Робочий частотний діапазон ПГ

ПГ працює на частотах значно менших частоти власних коливань. Теоретично, якщо повністю відсутні втрати заряду, який генерує ПЕ, то нижня межа діапазону робочих частот починалась практично з нульової частоти [12].

На рис.2.6 показана характерна АЧХ ПГ.

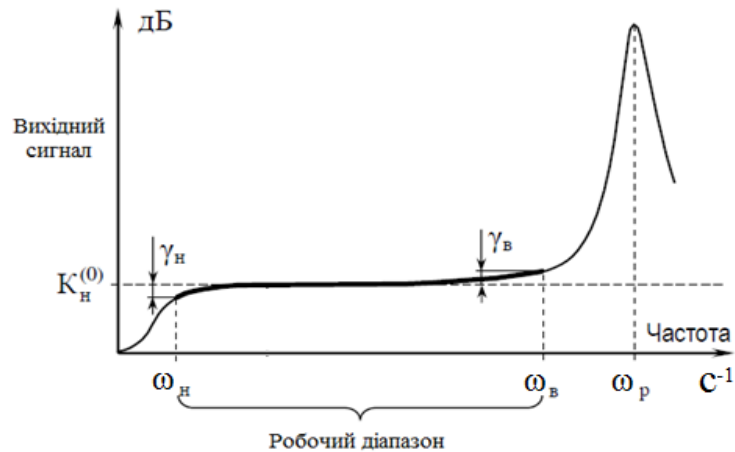


Рис.2.6. Залежність вихідної напруги ПГ від частоти при $g=const$: γ_n , γ_v – амплітудно-частотні похибки на низьких та високих частотах, K_n – коефіцієнт перетворення по напрузі; ω_n , ω_v – межі частотного діапазону (нижня, верхня); ω_p – частота резонансу ПГ

У літературі [2], [7] визначено переважну частоту ПСТ, яка складає 0.00175с^{-1} . Тому нижня межа частотного діапазону ПГ має бути меншою за вищезгадану частоту аномалії ПСТ, тобто менше за 0.00175с^{-1} . Верхня межа частотного діапазону ПГ має бути меншою за частоту резонансу ПГ, тобто за 0.1рад/с .

5) Температурна характеристика ПГ

Температурна характеристика нового ПГ у більшій мірі залежить від виду п'єзоматеріалу ЧЕ. Як зазначалось раніше, найкращий п'єзоматеріал для конструкції ЧЕ нового ПГ – ніобат літію, тому і будемо аналізувати його температурні характеристики.

Чутливість ніобату літію здатна змінюватись зі зміною температури, як і п'єзоелектрична постійна (рис.2.7,а).

В інтервалі температур від -300°C до 700°C зменшення п'єзоелектричного коефіцієнта складає 0.008% на 1°C , тобто, практично він залишається

незмінним. Під час нагрівання до температури $+1142^{\circ}\text{C}$ монокристал втрачає свої п'єзовластивості [16].

Зміна відносної діелектричної проникливості та питомого об'ємного опору при зміні температури до точки Кюрі показана на рис. 2.7, б,в. У той час, як діелектрична проникливість достатньо мало змінюється зі зміною температури, питомий опір змінюється суттєво.

Отже, ніобат літію задовольняє температурні вимоги експлуатації ПГ, які вказані у п.1.5 (діапазон температур: $-80 \dots +200^{\circ}\text{C}$).

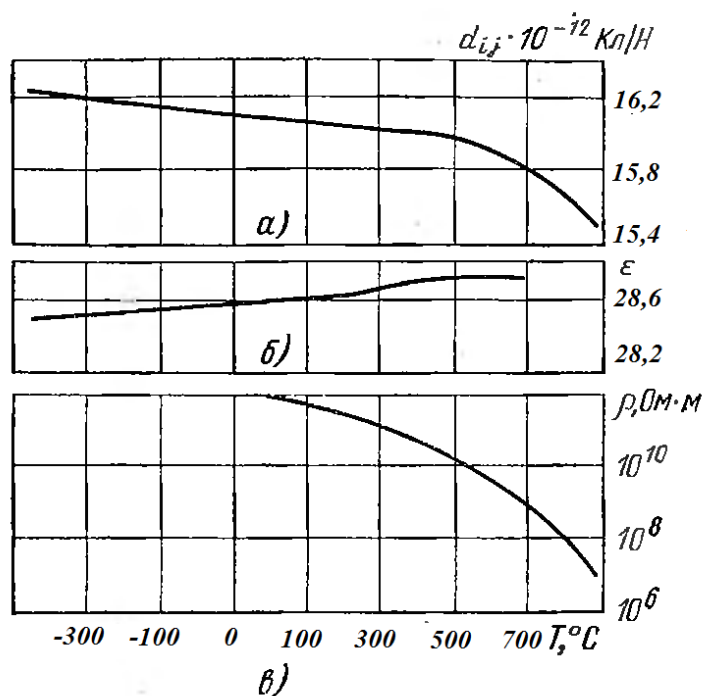


Рис. 2.7. Залежність а) п'єзомодуля; б) відносної діелектричної проникливості; в) питомого об'ємного опору від температури

2.7. Високоточний спосіб виставлення осі чутливості п'єзоелектричного гравіметра

Для АГС нового типу вимірювання аномалій ПСТ визначається здебільшого точністю виставлення осі чутливості ПГ. У реальних умовах роботи, вісь чутливості ПГ може відхилятися на деякий кут від напрямку місцевої вертикалі і, як наслідок, ПГ вимірює не істинне значення повного вектора прискорення сили тяжіння, а його проекцію на миттєве або змінне положення цієї осі чутливості. Тому пропонується декілька способів виставлення осі чутливості ПГ у нульове положення, перший з яких – високоточне виставлення осі чутливості гравіметра в тривимірному просторі [18].

Високоточне виставлення осі чутливості ПГ 1 у тривимірному просторі (рис.2.8.) забезпечується за рахунок високоточного виставлення у тривимірному просторі положення площини, що відповідає поверхні корпусу ПГ, на якій закріплені мітка 4 та світловідбиваючий елемент 7. У цій же площині розташовано напрямок місцевої вертикалі. Це забезпечується попередньою орієнтацією у тривимірному просторі фотоелектричного автоколіматора 8. За допомогою фотоелектричного автоколіматора 8 оцінюється відхилення цієї площини від положення, коли вона є перпендикулярною до оптичної осі фотоелектричного автоколіматора 8. Сигнал, пропорційний ступеню цього незбігу, надходить до другого входу цифрової ЕОМ 3. ЕОМ 3 керує просторовим положенням ГСП 2 таким чином, щоб ліквідувати цей незбіг. В результаті забезпечується розташування осі чутливості ПГ 1 у вертикальній площині перпендикулярно оптичній осі фотоелектричного автоколіматора 8.

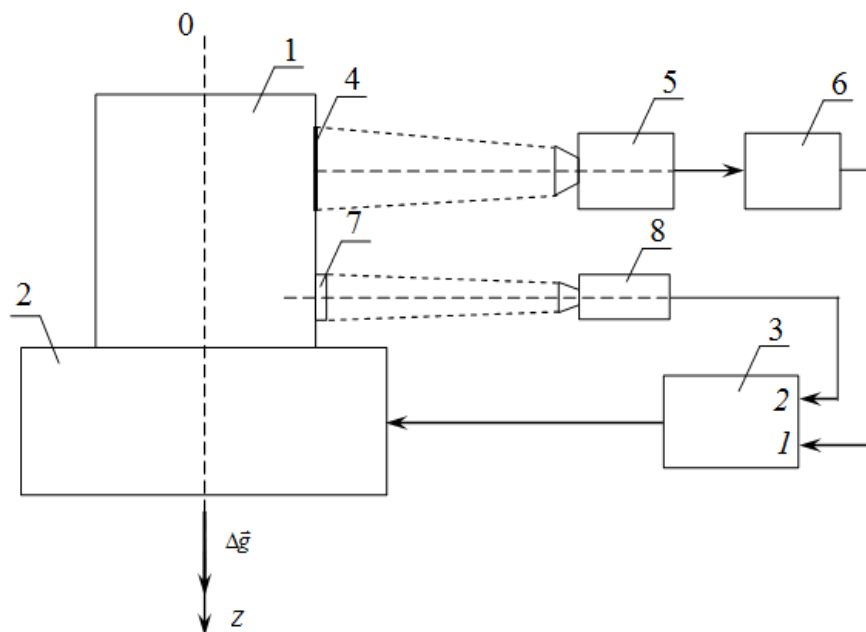


Рис. 2.8. Гравіметрична система з високоточним виставленням осі чутливості ПГ: 1 – ПГ, 2 – ГСП, 3 – ЕОМ, 4 – мітка, 5 – відеокамера, 6 – процесор лінійної апроксимації мітки, 7 – світловідбиваючий елемент, 8 – фотоелектричний автоколіматор

Однак, вісь чутливості ПГ 1 розташована у цій вертикальній площині, але зазвичай відхиляється на деякий кут від напрямку місцевої вертикалі. Це відхилення визначають за допомогою мітки 4, відеокамери 5 та процесора 6 лінійної апроксимації мітки. Відеокамера 5 оптично пов'язана із нанесеною на корпус ПГ 1 міткою 4 та реєструє відхилення даної мітки від напрямку місцевої вертикалі. Сигнал з відеокамери 5 поступає на вхід процесора 6 лінійної апроксимації відеозображення мітки. Після обробки, інформація з процесора 6 лінійної апроксимації відеозображення мітки надходить до першого входу цифрової ЕОМ 3, яка, у свою чергу, керує просторовим положенням ГСП 2 таким чином, щоб ліквідувати незбіг мітки 4 з напрямком місцевої вертикалі.

2.8. Склад і структура похибок двоканального п'єзоелектричного гравіметра

Для аналізу похибок ПГ треба дотримуватися такої їх класифікації: залежно від чинників, що зумовлюють похибки, – методичні, обумовлені недосконалістю методу вимірювання або невідповідністю об'єкта вимірювання його моделі, прийнятій для вимірювання та інструментальні, спричинені властивостями засобу вимірювання; за характером впливу – статичні, динамічні; залежно від повторюваності похибок – випадкові, які змінюється випадковим чином (як за знаком, так і за величиною) під час повторних вимірювань однієї і тієї ж величини та систематичні, які залишаються постійними або закономірно змінюється під час тих же вимірювань [84, 85].

2.8.1. Інструментальні похибки

Інструментальну похибку ПГ будемо визначати як суму похибок усіх величин, які безпосередньо впливають на кінцеві покази гравіметра [19].

Основна робоча формула перетворення ПСТ у напругу має наступний вигляд:

$$U_{ВИХ} = \frac{d_{ij} \cdot m \cdot g_z}{C_{ПЕ}} \quad (2.32)$$

де $U_{ВИХ}$ – вихідна напруга ПГ; g_z – ПСТ; d_{ij} – п'єзомодуль; m – маса ПЕ та ІМ разом; $C_{ПЕ}$ – електрична ємність ПЕ.

Істинне значення ПСТ визначається за формулою:

$$g_z = \frac{U_{ВИХ} \cdot C_{ПЕ}}{d_{ij} \cdot m} \quad (2.33)$$

Відносна похибка вихідного сигналу рівна сумі множин відносних похибок параметрів на показники ступенів цих параметрів:

$$\frac{\Delta g_z}{g_z} = \frac{\Delta U_{ВНХ}}{U_{ВНХ}} + \frac{\Delta C_{ПЕ}}{C_{ПЕ}} - \frac{\Delta d_{ij}}{d_{ij}} - \frac{\Delta m}{m} \quad (2.34)$$

Розглянемо кожен складову похибки:

1) Для розрахунку похибки зміни п'єзомодуля варто згадати про те, що матеріал з якого виготовлено ЧЕ нового ПГ, є кварц. У пункті 2.8 була наведена температурна характеристика ПГ. П'єзомодуль зі зміною температури змінюється по закону:

$$\Delta d_{ij} = d_{ij} \alpha_{cmp} \cdot \Delta t, \quad (2.35)$$

де α_{cmp} – температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу кварцу, Δt – величина зміни температури.

Відносна похибка зміни п'єзомодуля від зміни температури:

$$\left(\frac{\Delta d_{ij}}{d_{ij}} \right) = \alpha_{cmp} \Delta t. \quad (2.36)$$

Для ніобату літію $\alpha = 0.59 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [17], тоді

$$\left(\frac{\Delta d_{ij}}{d_{ij}} \right) = 0.59 \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 0.59 \cdot 10^{-6}. \quad (2.37)$$

2) Для розрахунку похибки від зміни електричної ємності використаємо формулу:

$$C_{ПЕ} = \frac{\varepsilon \cdot S}{h_n}, \quad (2.38)$$

де ε – діелектрична проникливість ніобату літію; S – площа ПЕ ; h_n – висота ПЕ.

Як бачимо із формули (2.41), похибка електричної ємності залежить від зміни діелектричної проникливості, у першу чергу, та площі, на яку діє ПСТ. У пункті 2.8 була наведена характеристика залежності зміни діелектричної

проникливості ніобату літію від зміни температури. У діапазоні температур від 0°C до $+500^{\circ}\text{C}$ ε змінилося лише на 0.5%, а у розрахунку на 1°C це становитиме 0.001%.

Отже, похибка від зміни діелектричної проникливості становитиме:

$$\left(\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}\right) = 1 \cdot 10^{-5}. \quad (2.39)$$

Відносна похибка від зміни площі ПЕ $\frac{\Delta S}{S}$:

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta l}{l}, \quad (2.40)$$

де $b=20 \cdot 10^{-3}\text{м}$, $l=20 \cdot 10^{-3}\text{м}$ – ширина та довжина ПЕ; $\Delta l, \Delta b = 0.8\text{мм}$ – допуски на сторони площі ПЕ.

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{0.8 \cdot 10^{-6}}{20 \cdot 10^{-3}} + \frac{0.8 \cdot 10^{-6}}{20 \cdot 10^{-3}} = 0.72 \cdot 10^{-4}. \quad (2.41)$$

Похибка від зміни висоти ПЕ $\frac{\Delta h_n}{h_n}$ при $\Delta h_n = 0.3\text{мм}$, буде дорівнювати:

$$\frac{\Delta h_n}{h_n} = \frac{0.3 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 10^{-3}} = 0.6 \cdot 10^{-4}. \quad (2.42)$$

Отже, похибка від зміни електричної ємності у сукупності буде рівна:

$$\frac{\Delta C_{\Pi}}{C_{\Pi}} = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} + \frac{\Delta S}{S} - \frac{\Delta h_n}{h_n} = 0.1 \cdot 10^{-4} + 0.72 \cdot 10^{-4} - 0.6 \cdot 10^{-4} = 0.22 \cdot 10^{-4}. \quad (2.43)$$

3) Для розрахунку похибки від зміни маси ЧЕ використаємо формулу:

$$m = \rho \cdot V, \quad (2.44)$$

де ρ – густина ніобату літію; V – об'єм ПЕ .

Похибка від зміни густини ПЕ, в основному, залежить від температури зовнішнього середовища, тому, по аналогії до похибки від зміни п'єзомодуля, маємо:

$$\left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right) = \alpha_{cmp} \Delta t, \quad (2.45)$$

де $\alpha_{cmp} = 0.59 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [17] – температурний коефіцієнт лінійного розширення для кварцу; Δt – величина зміни температури.

Відносна похибка зміни густини ПЕ:

$$\left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right) = 0.59 \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 0.59 \cdot 10^{-6}. \quad (2.46)$$

Похибка від зміни об'єму ПЕ розраховується наступним чином:

$$\left(\frac{\Delta V}{V} \right) = \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta h_n}{h_n} = 0,72 \cdot 10^{-4} + 0,6 \cdot 10^{-4} = 1,32 \cdot 10^{-4}. \quad (2.47)$$

Отже, похибка від зміни маси ПЕ одноканального ПГ буде рівна:

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta h_n}{h_n} = 0.59 \cdot 10^{-6} + 0.72 \cdot 10^{-4} + 0.6 \cdot 10^{-4} = 1.32 \cdot 10^{-4}$$

Для двоканального ПГ похибка від зміни маси ПЕ буде рівна:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta m}{m} &= \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta h_n}{h_n} = 2(0.59 \cdot 10^{-6} + 0.72 \cdot 10^{-4} + 0.6 \cdot 10^{-4}) = \\ &= 2 \cdot 1.32 \cdot 10^{-4} = 2.64 \cdot 10^{-4} \end{aligned} \quad (2.48)$$

4) Похибку від зміни напруги будемо визначати із наступних міркувань. Оскільки максимальна інструментальна похибка ПГ не повинна перевищувати 0.1 мГал (на порядок менша сумарної похибки ПГ 1 мГал), тобто $1 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2$, тому:

$$\frac{\Delta U_{BHX}}{U_{BHX}} = \frac{\Delta g_z}{g_z} - \frac{\Delta C_{PE}}{C_{PE}} + \frac{\Delta d_{ij}}{d_{ij}} + \frac{\Delta m}{m} = 0.01 \cdot 10^{-4} - 0.22 \cdot 10^{-4} + 0.0059 \cdot 10^{-4} + 1.3 \cdot 10^{-4} = 1.1 \cdot 10^{-4}. \quad (2.49)$$

Занесемо значення всіх похибок до табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Інструментальні похибки ПГ

№ п/п	Складові величини інструментальної похибки	Величина похибки
1	Зміна напруги, $\frac{\Delta U}{U}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$
2	Зміна п'єзомодуля, $\frac{\Delta d_{ij}}{d_{ij}}$	$0.0059 \cdot 10^{-4}$
3	Зміна електричної ємності ПЕ, $\frac{\Delta C_{PE}}{C_{PE}}$	$0.22 \cdot 10^{-4}$
4	Зміна маси, $\frac{\Delta m}{m}$	$2.6 \cdot 10^{-4}$
Сумарна інструментальна похибка		$4.93 \cdot 10^{-4}$

Чутливий елемент одно каналного ПГ [2] виконано у вигляді набору п'єзопластин. Частота власних коливань чутливого елемента є низькою і дорівнює 0.1 рад/с. При цьому п'єзопластини ПГ виконують функції чутливого елемента та фільтра низьких частот одночасно, відокремлюючи корисний сигнал прискорення сили тяжіння від високочастотних завад (в основному це вертикальне прискорення ЛА). Однак, конструкція ПГ[2], як

бачимо із табл. 2.3, не передбачає компенсацію інструментальних похибок від впливу зміни температури, вологості та тиску зовнішнього середовища, які є значними в екстремальних умовах, якими характеризуються гравіметричні вимірювання на ЛА.

Тому запропоновано для компенсації інструментальних похибок зробити новий низькочастотний ПГ двоканальним [5]. Для цього чутливий елемент виконано з двома каналами, в кожному з яких встановлено по одному п'єзоелементу. П'єзоелементи обох каналів є ідентичними і виконані у вигляді п'єзопластин та інерційної маси, що закріплені одне на одному. П'єзоелемент 3 одного каналу розташовано п'єзопластинами вниз, а п'єзоелемент 4 іншого каналу розташовано п'єзопластинами вгору. Виходи п'єзопластин обох каналів з'єднані з входами суматора 5, вихід якого з'єднаний із входом пристрою 2 обчислення вихідного сигналу гравіметра (рис. 2.1) [5,6].

На п'єзоелементи обох каналів діє прискорення сили тяжіння g_z , вертикальне прискорення \ddot{h} ЛА та інструментальні похибки Δi від впливу залишкової неідентичності конструкцій однакових п'єзопластин та мас, від впливу зміни температури, вологості та тиску зовнішнього середовища. Якщо спроектувати всі ці впливи на вимірювальну вісь Oz ПГ та врахувати те, що п'єзоелемент 3 одного каналу працює на стиснення, а п'єзоелемент 4 іншого каналу – на розтяг, то отримаємо:

$$u_1 = k(mg_z + m\ddot{h} + \Delta i),$$

$$u_2 = k(mg_z - m\ddot{h} - \Delta i),$$

де u_1 – вихідний електричний сигнал п'єзопластин одного каналу; u_2 – вихідний електричний сигнал п'єзопластин іншого каналу; m – вага інерційної маси у кожному каналі; k – п'єзоелектрична стала.

Вихідні електричні сигнали u_1 та u_2 п'єзопластин обох каналів сумуються у суматорі 5: $u_\Sigma = u_1 + u_2 = 2kmg_z$, де u_Σ – вихідний сигнал суматора 5.

Вихідний сигнал u_{Σ} суматора 5 подається у пристрій 2 обчислення вихідного сигналу гравіметра, де він обчислюється за певний інтервал часу. У кінцевому результаті отримуємо вихідний сигнал T пристрою 2 обчислення вихідного сигналу двоканального низькочастотного ПГ, який містить подвоєний сигнал прискорення сили тяжіння. У ньому повністю відсутні похибки вимірювань, які спричинені впливом вертикального прискорення \ddot{h} .

У двоканальній схемі нового ДПГ інструментальні похибки у двох каналах будуть з різними знаками. Тому сумарна інструментальна похибка ДПГ дорівнює нулю. Це є також перевагою ДПГ.

2.8.2. Похибка кріплення п'єзоелектричного гравіметра до основи

Необхідно приділяти значну увагу способу кріплення ПГ до ГСП чи іншої основи, на якій встановлено ПГ. Це кріплення, зазвичай, має вигляд пружного зв'язку (рис.2.9).

Недоліки у кріпленні ПГ до основи (невдало підібрані способи кріплення) можуть призвести до значних похибок ПГ.

Дані похибки впливають, головним чином, на частотну характеристику ПГ (поява резонансів). Похибки такого типу є незначними на частотах до 200 Гц, але потім вони суттєво впливають на покази ПГ. Існує графік залежності способів кріплення від величини частоти коливань основи (рис. 2.10) [12].

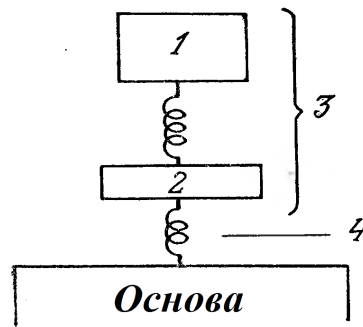


Рис. 2.9. Механічна модель ПГ: 1– ЧЕ; 2 – основа ПГ; 3 – ПГ; 4 – спосіб кріплення

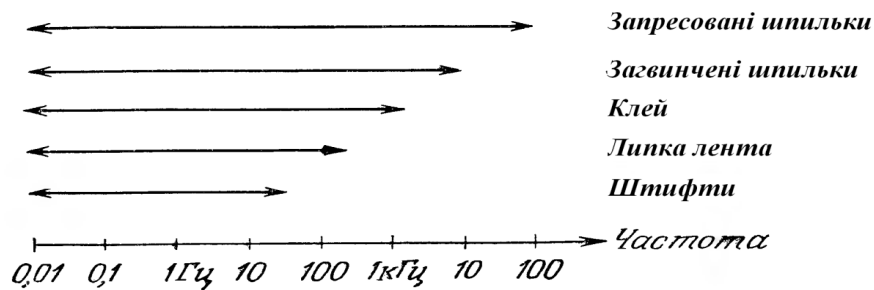


Рис. 2.10. Способи кріплення, які використовуються у залежності від робочого діапазону частот коливань основи

Існує загальне правило, яке стосується будь-якого способу кріплення – це максимально близький до ідеального стан поверхні основи.

Із графіка на рис. 2.10 у досліджуваному ДПГ обираємо спосіб кріплення – загвинчені шпильки (3 штуки). Даний спосіб кріплення відповідає досить великому робочому діапазону вимірювання ДПГ. Тобто, похибка виникає лише при вимірюваннях на частотах, більших за 10 кГц.

Шар змазки суттєво покращує сполучення ДПГ із основою. Однак, необхідно уникати попадання будь-яких дрібних елементів на шліфовану поверхню основи.

2.8.3. Похибка, зумовлена шумами

Відомі різні типи шумів, що діють у вимірювальних системах, причини виникнення яких можуть бути найрізноманітнішими. Тому, щоб гарантувати якісні показники ДПГ, необхідно враховувати всі можливі шуми і проектувати ДПГ так, щоб зменшити їх до рівня, при якому ними можна знехтувати при першому наближенні, чи взагалі ліквідувати їх вплив.

Одними із основних типів шумів, які необхідно зменшити у першу чергу, є шуми, зумовлені наявністю ємнісного зв'язку у конструкції ДПГ.

Найбільш поширений спосіб заглушення або усунення впливу такого шуму полягає у з'єднанні датчика з вимірювальною схемою екранованим або коаксіальним кабелем (рис.2.11). Заземлене екрануюче обплетення відіграє роль екрана між джерелом шумів і системою ДПГ. Сучасний коаксіальний кабель складається із центрального провідника, оточеного шаром діелектрика, зовнішня поверхня якого покрита обплетенням або фольгою і захисною зовнішньою оболонкою з пластику, що захищає кабель від дії навколишнього середовища.

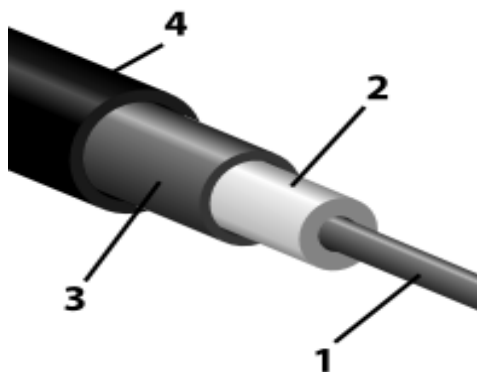


Рис. 2.11. Коаксіальний кабель: 1 – внутрішній провідник; 2 – ізоляція; 3 – зовнішній провідник; 4 – зовнішня оболонка

Однак, даний спосіб уникнення шумів передбачає відносно малу довжину екранованих кабелів. Також у процесі експлуатації коаксіальний кабель піддається впливу вологи і з часом значно погіршує свої характеристики.

Найбільш ефективним способом боротьби з шумами, наведеними емісійним шляхом, є використання скрученої пари проводів, відомої під назвою рівноважної (витої) пари (рис. 2.12). Внаслідок того, що взаємні перешкоди у кожній точці скрученої пари діють одна по відношенню до одної зустрічне, то ефект від їх впливу на вході підсилювача буде майже нульовим [12].

Після вибору типу кабелю, необхідно розглянути вплив шумів на покази ДПГ, викликаних сполученням цього кабелю із конструкцією ДПГ. Дійсно, деформації ізоляції чи здвиг ізоляції відносно провідників породжують рух зарядів, головним чином, під впливом п'єзоелектричних ефектів, а також через зміну просторового розподілу ємностей. Такі шуми можна зменшити, якщо кабель на ділянці збурення жорстко закріпити із вібруючою конструкцією.

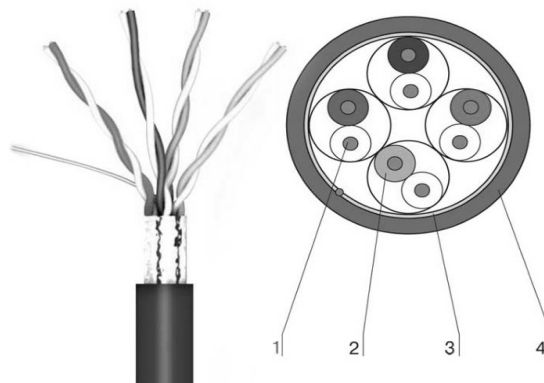


Рис. 2.12. Рівноважна пара CAT4 (чотири скручені пари): 1 – струмопровідна жила; 2 – ізоляція; 3 – загальний екран; 4 – зовнішня оболонка

Безпосередній вплив на покази ДПГ мають й акустичні шуми. Зокрема, цей вплив є суттєвим під час вимірювання саме ПСТ. Шуми такого роду здійснюють безпосередній вплив на ПЕ та місце кріплення ДПГ із конструкцією. Рівень даних похибок можна проілюструвати тим фактом, що

при рівні звукового тиску 100дБ паразитний сигнал ДПГ може складати близько 0.001g.

Однак, у новому ДПГ п'єзоелемент і система корпус-основа добре ізольовані один від одного, а це забезпечує значну стійкість до впливу акустичних шумів.

2.8.4. Похибка, викликана зміщенням нуля-пункту

Один із недоліків гравіметрів, які майже неможливо ліквідувати, є зміщення нуля-пункту, або дрейф. Зміщення нуля-пункту виявляється у тому, що на одному і тому ж місці, при незмінних умовах (температура і тиск) індекс ДПГ весь час повільно зміщується і відлік, взятий сьогодні, не співпадає з тим, який був взятий учора. Таке зміщення залежить від ряду обставин: температури зовнішнього середовища, режиму сигналу та інших факторів. Природа цього зміщення полягає у тому, що пружний елемент гравіметра (пружина, закручена нитка або, як у нашому випадку, п'єзоелемент), що знаходиться у напруженому стані, не точно слідує закону пропорційних деформацій. Відбувається “втомлення” пружного елемента внаслідок напруженості, і він поступово змінює деформацію при незмінному навантаженні [7].

Зміщення нуля-пункту коливається у різних системах і для різних матеріалів від десятих часток мілігала до декількох мілігал на добу.

У новому ДПГ похибка, викликана зміщенням нуля-пункту, практично може дорівнювати нулю протягом тривалого часу. Це пояснюється тим, що при низьких та середніх температурах покази залишаються сталими, а, по-друге, введений у систему контур зворотного зв'язку, постійно повертає ПЕ у початкове положення, компенсуючи вхідне навантаження.

2.9. Передатна функція двоканального п'єзоелектричного гравіметра

Будь-який засіб вимірювальної техніки, у тому числі й ПГ, прийнято розглядати як деякий перетворювач, що служить для перетворення вхідного сигналу у вихідний. У розділі 1 розглянуто конструкцію нового ПГ, тому на її основі побудуємо структурну схему перетворення вхідного сигналу ПСТ у вихідну напругу ПГ (рис.2.13). Аналіз даної схеми необхідний для визначення коефіцієнта $K_{ПГ}$ передачі ПГ [9].

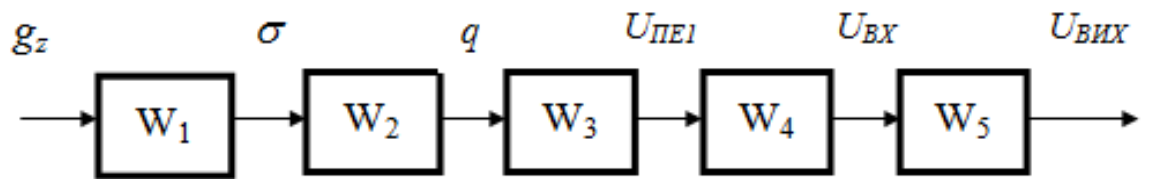


Рис.2.13. Структурна схема прямого перетворення сигналу ПГ

У схемі, зображеній на рис.2.13, ланці W_1 відповідає перетворення ПСТ g_z , що діє на ПЕ, у механічне напруження σ . Це механічне напруження чисельно рівне силі G , яка припадає на одиницю площі поперечного перерізу ПЕ. Якщо напруження постійне на всій площі перерізу ПЕ S , то $\sigma = G/S$, а тому:

$$W_1 = \frac{\sigma}{G} = \frac{G}{S} \cdot \frac{1}{G} = \frac{1}{S}. \quad (2.50)$$

Ланка W_2 відповідає перетворенню механічного напруження σ у заряд q на електродах ПЕ:

$$W_2 = \frac{q}{\sigma} = \frac{d_{ij} \cdot \sigma \cdot S}{\sigma} = d_{ij} S \quad (2.51)$$

де d_{ij} – п'єзомодуль.

Ланка W_3 відповідає перетворення заряду q у напругу $U_{ПЕ}$ на електродах ПЕ. Перетворення даного типу відображає схема на рис.3.5.

У відповідності до схеми на рис.2.14 для струму I можна записати:

$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{U_{\text{ПЕ}}}{R_{\text{ПЕ}}} + C_{\text{ПЕ}} \frac{dU_{\text{ПЕ}}}{dt}. \quad (2.52)$$

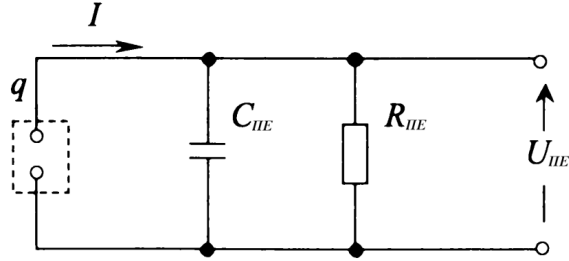


Рис.2.14. Еквівалентна схема перетворення ланки W_3

Якщо прийняти нульові початкові умови, то розв'язок диференційного рівняння матиме вигляд:

$$U_{\text{ПЕ}} = \frac{q}{(1 + \frac{1}{j\omega R_{\text{ПЕ}} C_{\text{ПЕ}}}) C_{\text{ПЕ}}}. \quad (2.53)$$

Звідси передатна функція буде дорівнювати:

$$W_3 = \frac{U_{\text{ПЕ}}}{q} = \frac{q}{q \cdot (1 + \frac{1}{j\omega R_{\text{ПЕ}} C_{\text{ПЕ}}}) C_{\text{ПЕ}}} = \frac{1}{(1 + \frac{1}{j\omega R_{\text{ПЕ}} C_{\text{ПЕ}}}) C_{\text{ПЕ}}}. \quad (2.54)$$

Однак, враховуючи велике значення $R_{\text{ПЕ}}$, можна прийняти:

$$W_3 = \frac{1}{C_{\text{ПЕ}}} \quad (2.55)$$

Ланка структурної схеми W_4 описує процес, який проходить при появі напруги на ПЕ (передача $U_{\text{ПЕ}}$ у коло $U_{\text{ВХ}}$). Її передатна функція відповідає передатній функції видозмінюючої диференціюючої ланки, схема якої представлена на рис.2.15. Тут $R_{\text{ВХ}}$ – вхідний опір підсилювача напруги.

Враховуючи великий опір ПЕ, вхідна частина підсилювача представлена лише опором R_{BX} .

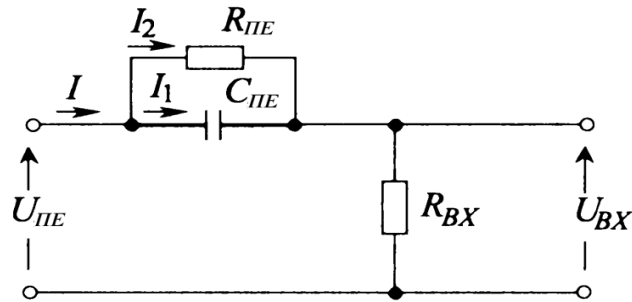


Рис. 2.15. Видозмінене диференціююче електричне коло

Для даної схеми можна записати:

$$U_{BX} = (I_1 + I_2) \cdot R_{BX}, \quad (2.56)$$

$$I_1 = C_{\Pi E} \frac{dU_{C_{\Pi E}}}{dt}, \quad (2.57)$$

$$I_2 = \frac{U_{C_{\Pi E}}}{R_{\Pi E}}. \quad (2.58)$$

Після підстановки (2.57-58) у (2.56) отримаємо:

$$U_{BX} = (C_{\Pi E} \frac{dU_{C_{\Pi E}}}{dt} + \frac{U_{C_{\Pi E}}}{R_{\Pi E}}) R_{BX}. \quad (2.59)$$

Відповідно до закону Кірхгофа, маємо:

$$U_{C_{\Pi E}} = I_2 R_{\Pi E} = U_{\Pi E} - U_{BX}. \quad (2.60)$$

Підставивши (2.60) у (2.59) отримаємо:

$$U_{BX} = C_{\Pi E} R_{BX} \frac{d(U_{\Pi E} - U_{BX})}{dt} + \frac{R_{BX}}{R_{\Pi E}} (U_{\Pi E} - U_{BX}). \quad (2.61)$$

Для подальших розрахунків введемо коефіцієнт:

$$\varepsilon_R = \frac{R_{\Pi E} + R_{BX}}{R_{BX}} \quad (2.62)$$

Поділимо вираз (2.61) на коефіцієнт ε_R :

$$\frac{U_{BX}}{\varepsilon_R} = \frac{C_{\Pi E} R_{BX}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{\Pi E}}{dt} - \frac{C_{\Pi E} R_{BX}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{BX}}{dt} + \frac{1}{\varepsilon_R} \frac{R_{BX}}{R_{\Pi E}} U_{\Pi E} - \frac{1}{\varepsilon_R} \frac{R_{BX}}{R_{\Pi E}} U_{BX}. \quad (2.63)$$

Згрупуємо члени рівняння (2.63) та позбудемося знаменника $R_{\Pi E}$:

$$\frac{R_{\Pi E} U_{BX}}{\varepsilon_R} + \frac{R_{BX}}{\varepsilon_R} U_{BX} + \frac{C_{\Pi E} R_{BX} R_{\Pi E}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{BX}}{dt} = \frac{C_{\Pi E} R_{BX} R_{\Pi E}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{\Pi E}}{dt} + \frac{R_{BX}}{\varepsilon_R} U_{\Pi E}, \quad (2.64)$$

$$U_{BX} + \frac{C_{\Pi E} R_{\Pi E}}{\varepsilon_R} \cdot \frac{dU_{BX}}{dt} = \frac{1}{\varepsilon_R} (C_{\Pi E} R_{\Pi E} \cdot \frac{dU_{\Pi E}}{dt} + U_{\Pi E}). \quad (2.65)$$

Позначимо постійну часу $\tau = R_{\Pi E} C_{\Pi E}$. Після підстановки постійної часу у рівняння (3.29) та введення оператора Лапласа, отримаємо:

$$(1 + \frac{\tau}{\varepsilon_R} p) U_{BX} = \frac{1}{\varepsilon_R} (1 + \tau p) U_{\Pi E}. \quad (2.66)$$

Звідси передатна функція W_4 буде дорівнювати:

$$W_4(p) = \frac{U_{BX}}{U_{\Pi E}} = \frac{1}{\varepsilon_R} \frac{1 + \tau p}{1 + \frac{\tau}{\varepsilon_R} p}. \quad (2.67)$$

Ланка W_5 відповідає передатній характеристиці підсилювача напруги [9], яка поводить себе, як інерційна ланка першого порядку:

$$W_5(p) = \frac{K_{оп}}{1 + p \tau_{оп}}, \quad (2.68)$$

де $K_{ПО}$ – коефіцієнт підсилення операційного підсилювача; $\tau_{ОП}$ – постійна часу.

Однак, враховуючи роботу перетворювача переважно у вузькому діапазоні частот, передатну характеристику можна прирівняти лише до коефіцієнта підсилення:

$$W_5 = K_{ОП}. \quad (2.69)$$

Отже, передатна функція $W_{np}(p)$ сигналу у ПЕ матиме вигляд:

$$W_{np}(p) = W_1 W_2 W_3(p) W_4(p) W_5 = d_{ij} \cdot \frac{1}{C_{ПЕ}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_R} \frac{1 + \tau p}{1 + \frac{\tau}{\varepsilon_R} p} \cdot K_{ОП}. \quad (2.70)$$

Однак, ПЕ має схильність розряджатись, тому до схеми прямого перетворення сигналу необхідно додати контур від'ємного зворотного зв'язку. Схема п'єзоперетворювача матиме наступний вигляд (рис.2.16) і буде складатись із ПЕ та підсилювача напруги. На ПЕ нанесені три електроди 1,2 та 3. Перший електрод підключений до входу підсилювача, другий – до загального проводу схеми, а третій, додатковий електрод, – до виходу підсилювача напруги.

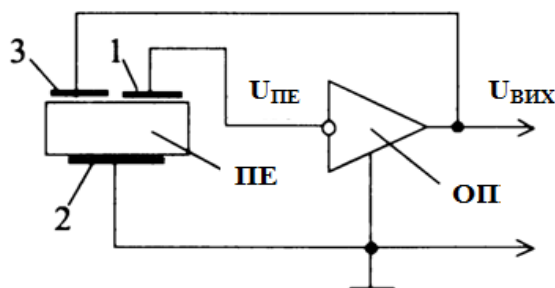


Рис. 2.16. ПГ зі зворотним від'ємним зв'язком: 1,2,3 – електроди; ОП – операційний підсилювач напруги; ПЕ – п'єзоелемент

Структурна схема такого п'єзоперетворювача показана на рис. 2.17.

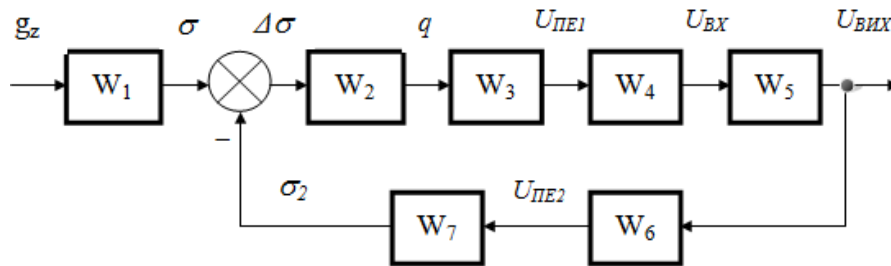


Рис. 2.17. Структурна схема ПГ з електромеханічним зворотним зв'язком

Ланка W_6 описує процес, який є оберненим до процесу ланки W_4 та проходить під час підведення напруги від підсилювача до додаткового електрода ПЕ. Еквівалентна схема цього процесу представлена на рис.2.18. Тут $R_{ВИХ}$ – вихідний опір операційного підсилювача.

Розв'язуючи по аналогії до вирішення для ланки W_4 , отримаємо:

$$W_6(p) = \frac{U_{ПЕ2}}{U_{ВИХ}} = \gamma_R \frac{(1 + \frac{\tau}{p})}{(1 + \tau p)}, \quad (2.71)$$

де $\gamma_R = (R_{ПЕ} + R_{ВИХ}) / R_{ВИХ}$; $\tau = R_{ПЕ} C_{ПЕ}$.

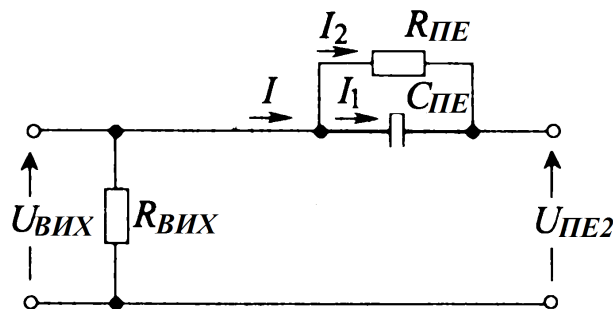


Рис.2.18. Видозмінений диференціюючий ланцюг (ланка W_6)

Ланка W_7 відповідає перетворюванню напруги $U_{ПЕ2}$ у механічне напруження σ_2 . Оскільки $\sigma_2 = Yd_{ij}U_{ПЕ2}/l$, то

$$W_7(p) = \frac{\sigma_2}{U_{ПЕ2}} = \frac{Yd_{ij}U_{ПЕ2}}{U_{ПЕ2} \cdot l} = \frac{Yd_{ij}}{l}, \quad (2.72)$$

де Y – модуль Юнга; l – довжина ПЕ [10].

Отже, коефіцієнт передачі $K_{ПГ}$ ПГ дорівнюватиме:

$$K_{ПГ}(p) = \frac{W_1 W_2 W_3(p) W_4(p) W_5(p)}{1 + W_2 W_3(p) W_4(p) W_5(p) W_6(p) W_7} = W_1 \frac{W(p)}{1 + W(p)Z(p)}, \quad (2.73)$$

де W_1 – передатна функція, яка відповідає за перетворення сили $G \equiv m \cdot g_z$ у механічне напруження; $W(p) = W_2 W_3(p) W_4(p) W_5(p)$ – коефіцієнт передачі ланцюга прямого перетворення ПСТ, охопленого від’ємним зворотним зв’язком; $Z(p) = W_6(p) W_7$ – коефіцієнт передачі ланцюга від’ємного зворотного зв’язку.

Підставивши всі значення часткових передатних функцій ПЕ у (2.73), отримаємо:

$$K_{ПГ}(p) = \frac{1}{S} \left[\frac{d_{ij} S \cdot \frac{1}{C_{ПЕ}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_R} \frac{1+p}{1+\frac{\tau}{\varepsilon_R} p} \cdot K_{ОП}}{1 + d_{ij} S \cdot \frac{1}{C_{ПЕ}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_R} \frac{1+p}{1+\frac{\tau}{\varepsilon_R} p} \cdot K_{ОП} \cdot \gamma_R \frac{(1+\frac{\tau}{\varepsilon_R} p)}{(1+p)} \cdot \frac{Yd_{ij}}{l}} \right] \quad (2.74)$$

Оскільки ланки W_4 та W_6 описують процеси, які є оберненими один до одного, то можна припустити, що їх добуток буде приблизно рівний одиниці, а рівність (2.74) матиме вигляд:

$$K_{\Pi\Gamma}(p) = \frac{1}{S} \left[\frac{d_{ij} S \cdot \frac{1}{C_{\Pi E}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_R} \frac{1 + \tau p}{1 + \frac{\tau}{\varepsilon_R} p} \cdot K_{OP}}{1 + d_{ij} S \cdot \frac{1}{C_{\Pi E}} \cdot K_{OP} \cdot \frac{Y d_{ij}}{l}} \right] \quad (2.75)$$

Похибка ПГ, як і, власне, всіх п'єзоперетворювачів найбільше залежить від стабільності п'єзомодуля та коефіцієнта електромеханічного зв'язку під впливом дестабілізуючих факторів. Тому, як показано у [11], для її мінімізації вводять наступну умову:

$$W(p) \cdot Z(p) \approx 1. \quad (2.76)$$

Із умови (2.76) видно, що добуток коефіцієнта передачі ланцюга прямого перетворення, охопленого від'ємним зворотним зв'язком, на коефіцієнт передачі ланцюга зворотного зв'язку дорівнює одиниці. Це є принципіальною відмінністю нового ПГ від відомих вимірювальних систем, у яких дана умова має вигляд:

$$W(p) \cdot Z(p) \rightarrow \infty. \quad (2.77)$$

Однак на практиці добуток $W(p) \cdot Z(p)$ може дещо відрізнитись від одиниці, бо ці коефіцієнти залежать також від форми, розмірів та просторового розташування електродів, а також від утворених у каналах передачі ПЕ додаткових електричних полів. Новий ПГ працює в області низьких частот, тому введений зворотний зв'язок є частотно-залежним. Таким чином, параметри зворотного зв'язку можуть суттєво змінювати властивості ПГ, його частотні та перехідні характеристики, при цьому як зменшуючи, так і збільшуючи його власну частоту. Оскільки власна частота ПГ має бути відносно низькою, рівною 0.1 рад/с, а добротність максимальною, тому необхідно підбирати саме параметри R_{BHX} та R_{BX} за відповідними критеріями.

Введення від'ємного зворотного зв'язку суттєво впливає на нелінійні відхилення системи. Це можна показати по формулі:

$$U_{2k}^* = \frac{U_{2k}}{1 + W(p) \cdot Z(p)}, \quad (2.78)$$

де U_{2k}^* – напруга відповідної гармоніки на виході перетворювача; U_{2k} – напруга відповідної гармоніки на вході перетворювача із від'ємним зворотнім зв'язком.

Таким чином, зменшуючи напругу гармонік на виході замкненої системи, від'ємний зворотній зв'язок лінеалізує систему, зменшуючи тим самим частотні відхилення.

При проведенні вимірювань завжди виникає перехідний процес, при якому сигнал на виході засобу вимірювання суттєво змінюється у часі. Це пояснюється інерційними властивостями засобу вимірювання, які зумовлюють виникнення динамічної похибки [20].

У пункті 2.3. було виведено рівняння динаміки ДПГ:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + n \frac{dx}{dt} + \kappa x = -2mg_z, \quad (2.79)$$

де m – величина ІМ; n – коефіцієнт затухання; κ – коефіцієнт пружності, який залежить від властивостей ПЕ.

Також, шляхом застосування перетворення Лапласа для рівняння (2.79), отримано передатну функцію ДПГ:

$$W_{\text{ДПГ}}(p) = \frac{2K_{\text{ДПГ}}}{T_1 p^2 + T_2 p + 1} = \frac{2 \cdot m \cdot K_{\text{ДПГ}}}{m p^2 + n p + \kappa}, \quad (2.80)$$

де $W_{\text{ДПГ}}(p)$ – передатна функція ДПГ; $K_{\text{ДПГ}}$ – коефіцієнт передачі ДПГ (статичний); T_1 і T_2 – коефіцієнти, що визначають постійні часу об’єкта другого порядку.

Значення $\omega_0 = 0.1$ рад/с – власна частота ДПГ, а ξ – коефіцієнт демпфування.

Коефіцієнт демпфування будемо обирати із наступних міркувань [12]. У пружних системах найчастіше обирають коефіцієнт демпфування у межах ($\xi=0.6\div0.8$). Зростання даного коефіцієнта призводить до зменшення максимальної амплітуди динамічної похибки, однак надмірне передемпфування може призвести до зростання фазової затримки та часу регулювання. Тому оберемо $\xi = 0.705$.

Отже, отримано рівняння коливального процесу інерційної маси, яка закріплена на ПЕ.

$$W_{\text{ДПГ}}(p) = \frac{2K_{\text{ДПГ}}}{p^2 + 2 \cdot 0.1 \cdot 0.705 p + 0.1^2}. \quad (3.107)$$

А передатна функція прямого перетворення сигналу ПСТ у напругу матиме вигляд:

$$W_{\text{ДПГ}}(p) = \frac{2K_{\text{ДПГ}}}{0.01(100p^2 + 14p + 1)}. \quad (3.108)$$

У п. 3.4 визначено вираз для розрахунку статичного коефіцієнта передачі ДПГ:

$$K_{\text{ДПГ}} = \frac{2}{S} \left[\frac{d_{ij} S \cdot \frac{1}{C_{\text{ПЕ}}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_R} \cdot \frac{1 + \tau p}{1 + \frac{\tau}{\varepsilon_R} p} \cdot K_{\text{ОП}}}{1 + d_{ij} S \cdot \frac{1}{C_{\text{ПЕ}}} \cdot K_{\text{ОП}} \cdot \frac{Y d_{ij}}{l}} \right]. \quad (3.109)$$

Приберемо із рівняння (3.109) складові, які безпосередньо пов'язані із параметрами підсилювача напруги, оскільки розрахунок підсилювача у даній роботі не проводиться, і отримаємо:

$$K_{ДПГ} = \frac{2}{S} \left[\frac{d_{ij} S \cdot \frac{1}{C_{ПЕ}}}{1 + d_{ij} S \cdot \frac{1}{C_{ПЕ}} \cdot \frac{Y d_{ij}}{l}} \right] \quad (3.110)$$

Підставимо обчислені раніше параметри у формулу (3.110) і отримаємо:

$$K_{ДПГ} = \frac{2}{5 \cdot 10^{-4}} \left[\frac{16.2 \cdot 10^{-12} \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{25.33 \cdot 10^{-12}}}{1 + \frac{16.2 \cdot 10^{-12} \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{25.33 \cdot 10^{-12}} \cdot \frac{95 \cdot 10^9 \cdot 16.2 \cdot 10^{-12}}{0.02}} \right] = 1.282 \quad (3.111)$$

Кінцева передатна функція ДПГ, яка буде досліджуватись у подальшому, матиме вигляд:

$$W_{ДПГ}(p) = \frac{K_{ДПГ}}{0.01(100p^2 + 14p + 1)} = \frac{128.2}{100p^2 + 14p + 1}. \quad (3.112)$$

2.10. Дослідження стійкості двоканального п'єзоелектричного гравіметра

Стійкість систем автоматичного керування (САК) або, як у нашому випадку, стійкість ДПГ – це здатність системи не допускати нескінченного відхилення регульованої величини від заданого значення при будь-якому реальному збуренні.

Досліджувана система є нелінійною, як і більшість систем у природі та техніці. Однак, оскільки нелінійність є незначною, то припустимо, що функція передачі ДПГ носить лінійний характер.

У стійкої системи ДПГ при будь-якому реальному збуренні на неї регульована величина при перехідному процесі не буде нескінченно відхилятися від заданого значення. Існує багато критеріїв стійкості, як аналітичних, так і графічних. Найпоширенішими є критерії Найквіста та Гурвіца. Тому саме за цими критеріями оцінимо стійкість системи ДПГ.

2.10.1. Стійкість за критерієм Гурвіца

За даним критерієм спочатку із коефіцієнтів характеристичного рівняння будують головний визначник Гурвіца за наступним правилом: по головній діагоналі визначника зліва направо записують усі коефіцієнти характеристичного рівняння від a_{n-1} до a_n в порядку спадання індексів.

Стовпці вгору від головної діагоналі доповнюють коефіцієнтами характеристичного рівняння з послідовно спадаючими індексами, а стовпці вниз — коефіцієнтами з послідовно зростаючими індексами. На місце коефіцієнтів з індексами більше n (n — порядок характеристичного рівняння) і менше нуля проставляють нулі.

Характеристичне рівняння системи ДПГ:

$$D(p) = T^2 p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot p + (1 + K) = 100p^2 + 14p + (1 + 128.2) \quad (3.113)$$

Критерій стійкості Гурвіца: для того щоби система автоматичного керування була стійка, необхідно і достатньо, щоб усі визначники Гурвіца мали знаки, однакові зі знаком старшого коефіцієнта характеристичного рівняння a_n , тобто при $a_{n-1} > 0$ були додатними [20].

Таким чином, необхідною і достатньою умовою стійкості для системи другого порядку є додатність коефіцієнтів характеристичного рівняння. В нашій системі спостерігаємо наступне:

$$a_0 = T^2 = 100 > 0$$

$$a_1 = 2 \cdot \xi \cdot T = 14 > 0 \quad (3.114)$$

$$a_2 = 1 + K = 129.2 > 0$$

Отже, робимо висновок, що за критерієм стійкості Гурвіца, система ДПГ є стійкою.

2.10.2. Стійкість за критерієм Найквіста

Для дослідження ДПГ на стійкість за критерієм Найквіста використаємо передатну функцію ДПГ:

$$W_{\text{ДПГ}}(p) = \frac{128.2}{100p^2 + 14p + 1}. \quad (3.115)$$

У рівність (3.115) підставимо $p=j\omega$ та отримаємо частотну функцію передачі ДПГ:

$$W(j\omega) = \frac{128.2}{-100\omega^2 + 14j\omega + 1} = \frac{128.2(1 - 100\omega^2 + 14j\omega)}{(1 - 100\omega^2)^2 + j(-14\omega)^2} = X(\omega) + jY(\omega), \quad (3.116)$$

де $X(\omega), Y(\omega)$ – дійсна та уявна частини частотної функції передачі ДПГ відповідно.

Виділимо із рівності (3.116) дійсну та уявну частину і знайдемо точку перетину амплітудно-фазової характеристики (АФХ) дійсну вісь $X(\omega)$:

$$\begin{cases} X(\omega) = \frac{128.2(1-100\omega^2)}{(1-100\omega^2)^2 + j(-14\omega)^2}; \\ Y(\omega) = \frac{128.2 \cdot 14\omega}{(1-100\omega^2)^2 + j(-14\omega)^2}; \\ X(0) = 128.2. \end{cases} \quad (3.117)$$

На основі розрахованих даних будуємо АФХ (рис.3.19) в програмному середовищі MatLab (годограф Найквіста).

Для того, щоб система ДПГ була стійкою необхідно та достатньо, щоб годограф Найквіста не охоплював точку з координатами $(-1 ; j0)$. Отже, система ДПГ стійка.

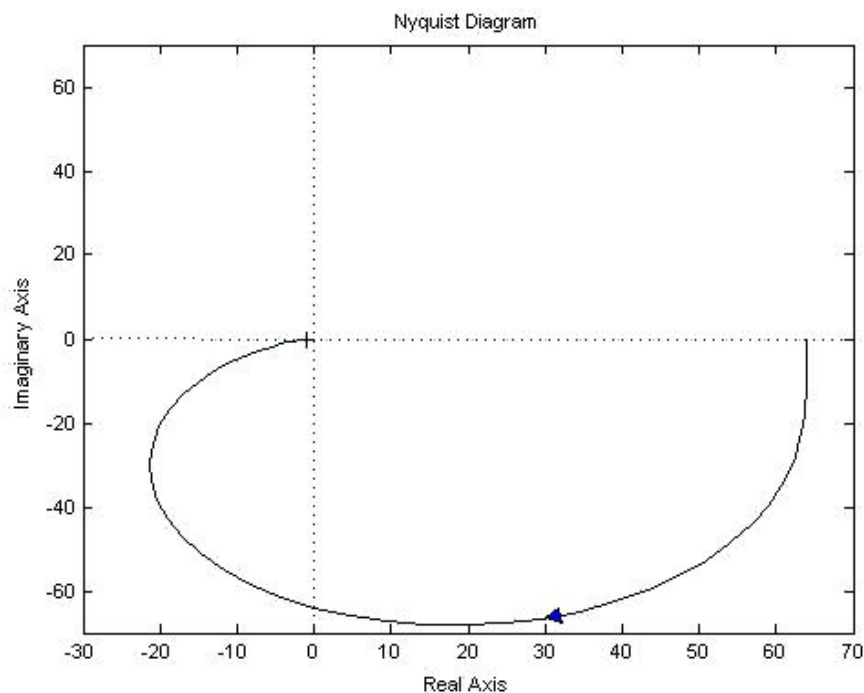


Рис. 3.19. Амплітудо-фазова характеристика ДПГ

2.11. Висновки до розділу 2

2.11.1. Для побудови нового ДПГ обрано прямий повздовжній п'єзоефект.

2.11.2. Отримано математичну модель роботи нового ДПГ (2.3) та виведено основне робоче рівняння руху автоматизованої АГС із ДПГ (2.13).

2.11.3. Перетворено рівняння руху ДПГ у вигляд, зручний для подальшого моделювання на ЕОМ (2.12).

2.11.4. Розглянуто способи розміщення ПЕ у конструкції ДПГ та зроблено їх порівняльну характеристику, визначено їх переваги та недоліки. Обрано наступний спосіб розміщення ПЕ – нецентрований та затиснений за допомогою гвинта.

2.11.5. Проведено аналіз основних видів п'єзоматеріалів (кварц, ніобат літію, турмалін, сегнетова сіль, сульфат літію, дигідрофосфат амонію, кераміка) для ЧЕ нового ДПГ. Матеріалом для ЧЕ нового ДПГ обрано ніобат літію. Ніобат літію має високу стійкість до зміни зовнішніх температур та тисків, високий коефіцієнт електромеханічного зв'язку та стабільні п'єзоелектричні властивості, що є важливим безпосередньо для конструкції ДПГ.

2.11.6. Розраховано основні електричні параметри ПЕ та запропоновано у ролі ЧЕ використовувати п'єзопакет.

2.11.7. Вирішено проблему фільтрації вихідного сигналу ДПГ від високочастотних завад за рахунок використання п'єзоелемента нового ДПГ як у якості ЧЕ, так і фільтра низьких частот. Запропоновано способи конструкційного досягнення власної частоти ПГ 0.1 рад/с. Обрано найоптимальніший із них – за рахунок збільшення вхідного опору операційного підсилювача.

2.11.8. Визначено основні характеристики ДПГ, такі як: робочий діапазон ПСТ, робочий частотний діапазон, температурну залежність п'єзоелектричних параметрів ПЕ та інші.

2.11.9. Розраховано частоту власних коливань ДПГ 0.1 рад/с, яка забезпечує відсутність необхідності використання додаткової фільтрації вихідного сигналу ДПГ від вертикального прискорення ЛА, яке є основним збуренням.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОКАНАЛЬНОГО П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ГРАВІМЕТРА

У літературі [1-4], [21] відсутні будь-які експериментальні дослідження двоканального п'єзоелектричного гравіметра. Тому метою даного розділу є здійснення такого дослідження в умовах, близьких до авіаційних.

Задачі розділу наступні: створити експериментальну установку для дослідження основних характеристик ДПГ та обґрунтувати можливість його застосування у складі АГС; зробити конструктивний та аналітичний опис кожної складової експериментальної установки; проаналізувати програмне забезпечення для відображення результатів досліджень на ЕОМ; провести експериментальні дослідження та побудувати графіки основних необхідних залежностей; вивести рівняння руху ДПГ, в якому враховано основні фактори, що впливають на проведення авіаційних гравіметричних вимірювань; викласти методику і рекомендації з проведення випробувань ДПГ.

3.1. Опис експериментальної установки для досліджень двоканального п'єзоелектричного гравіметра

Для проведення експериментальних досліджень ДПГ була створена експериментальна установка, принципова схема якої зображена на рис.3.1, а зовнішній вигляд – на рис.3.2. До її складу входять наступні прилади: генератор механічних коливань ГМК-1 (вібростенд) із вбудованими в нього двома індукційними перетворювачами електричного сигналу у механічний; ДПГ, який розташований безпосередньо на вібростенді; мікросистема зібрання даних (модуль введення-виведення); блок підсилення вихідного сигналу ДПГ; ЕОМ; генератор змінної напруги та вольтметри для реєстрації напруги генератора та напруги індукційного перетворювача відповідно [22].

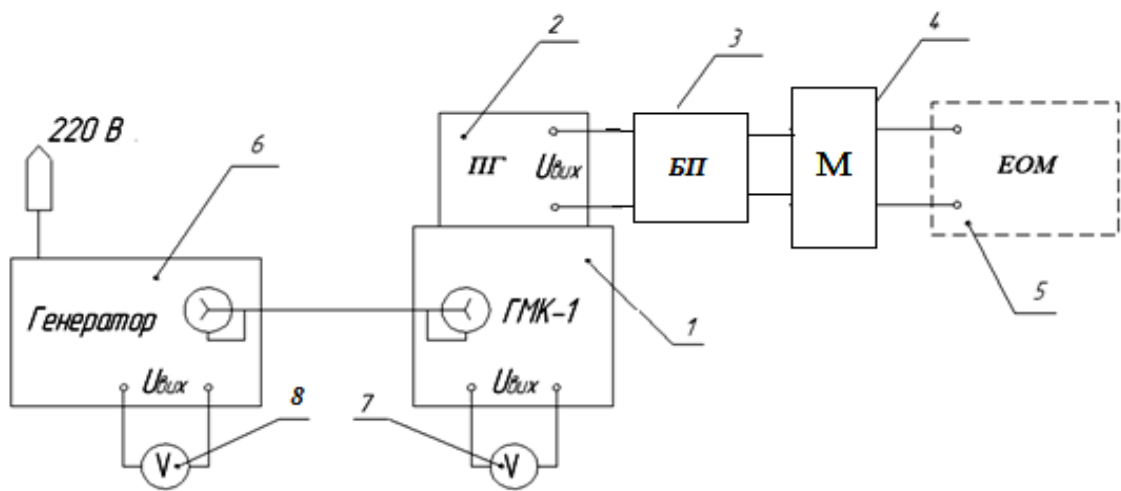


Рис. 3.1. Принципова схема установки для експериментальних досліджень ДПГ: 1 – ГМК-1; 2 – ДПГ; 3 – блок підсилення вихідного сигналу ДПГ; 4 – мікросистема зібрання даних (модуль введення-виведення); 5 – ЕОМ; 6 – генератор змінної напруги живлення; 7 – вольтметр для реєстрації напруги генератора; 8 – вольтметр для реєстрації напруги індукційного перетворювача

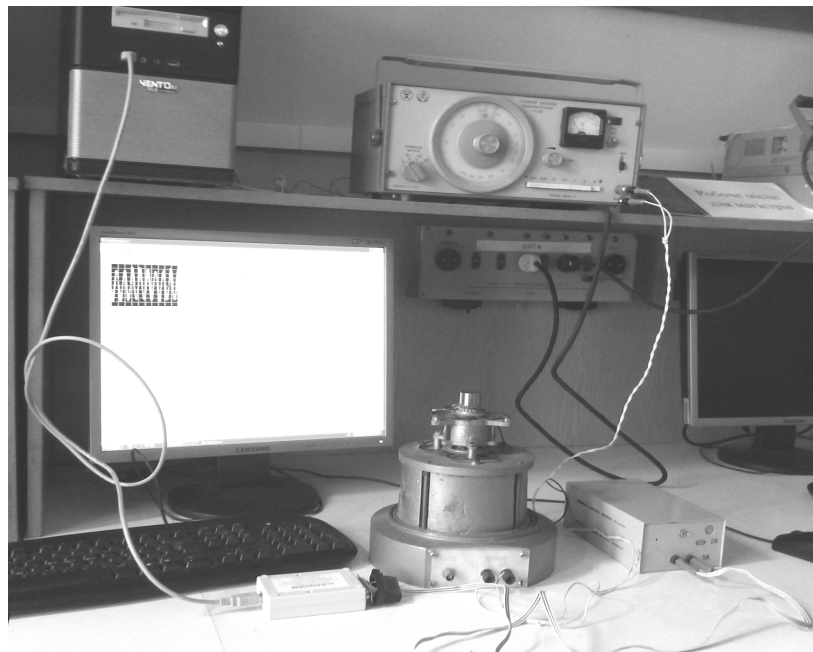


Рис. 3.2. Зовнішній вигляд установки для експериментальних досліджень ДПГ

3.1.1. Вібростенд експериментальної установки

Основою частиною експериментальної установки є вібростенд ГМК – 1 (рис. 3.3) або генератор механічних коливань, конструктивно виконаний у вигляді двох магнітопроводів 8, 10 (рис.3.4). Ці магнітопроводи жорстко скріплені й утворюють єдину конструкцію соленоїдного типу. Стрижень 7 може рухатись у середині соленоїда, створеного двома магнітопроводами 8, 10.

Рушійну силу для переміщень стрижня 7 створюють індукційні перетворювачі 1, 3, обмотки 1, 2 та 3, 4. Обмотки 1, 3 виконують функції збудження, а 2, 4 – управління [22].

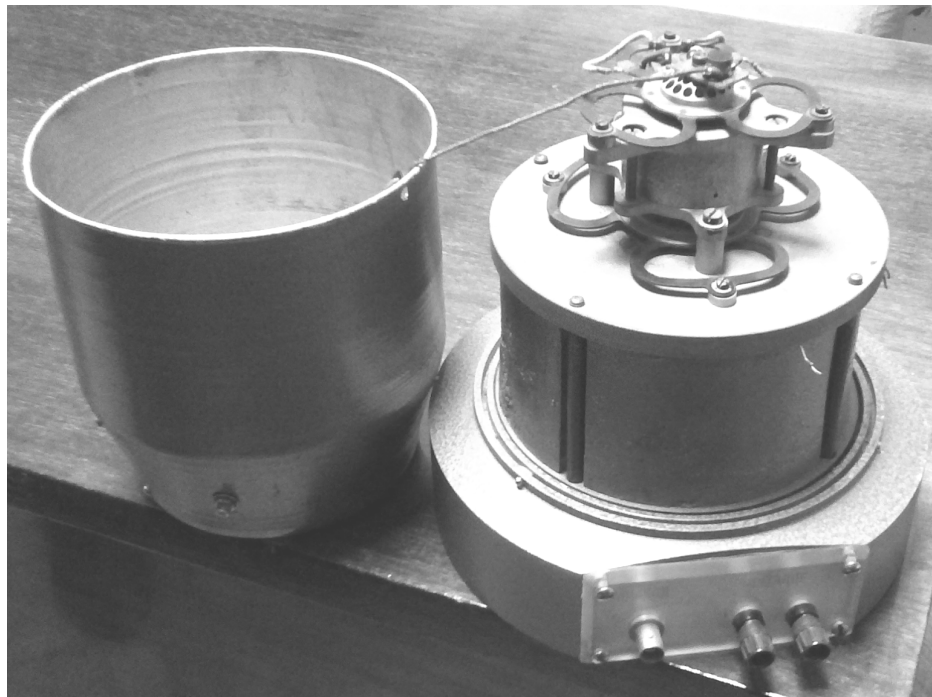


Рис. 3.3. Генератор механічних коливань ГМК-1

Індукційні перетворювачі у схемі призначені для перетворення вхідного електричного сигналу збудження у вихідний механічний сигнал переміщення стрижня.

Стрижень 7 із обмотками 1, 2 та 3, 4 утримується гнучкими опорами у вигляді мембран 6 і 9 спеціального типу, які поєднують достатню жорсткість з великим значенням лінійної ланки силової характеристики.

Закріплення стрижня з обох сторін мембранами дозволяє звести до мінімуму рух по напрямках, які не співпадають із повздовжньою віссю. Це забезпечить стрижню лише один ступінь свободи у потрібному напрямку вертикальної осі. Тому, якщо через генераторну обмотку пропустити струм, то сила, що створюється генераторною обмоткою призведе до вертикального переміщення стрижня.

Таким чином вібростенд ГМК-1, створюючи коливальні прискорення стрижня, діє на робочий стіл 5, де і знаходиться ДПГ.

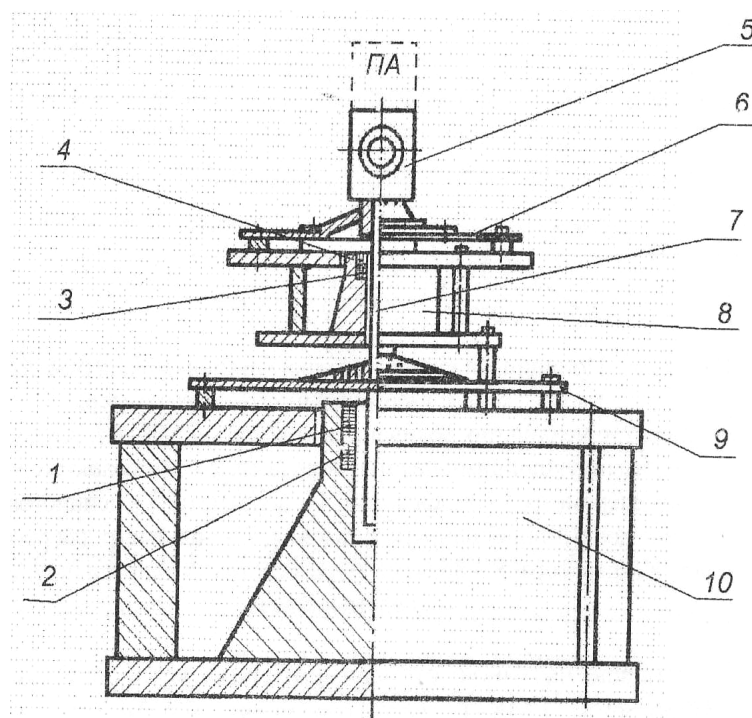


Рис.3.4. Генератор механічних коливань: 1,3 – генераторні обмотки; 2,4 – обмотки управління; 5 – робочий стіл; 6,9 – гнучкі мембрани; 7 – стрижень; 8,10 – магнітопроводи

Якщо через генераторну обмотку 1 вібростенда пропускати струм, що змінюється у часі по синусоїдальному закону, то сила, що створюється генераторною обмоткою призведе до переміщення h стрижня, яке також відбудеться по синусоїдальному закону:

$$h = H \sin \omega t, \quad (3.1)$$

де H , $\omega = 2\pi f$ - амплітуда та частота коливальних переміщення стрижня відповідно.

Величина переміщення h при коливаннях стрижня пов'язана зі значеннями діючих на ДПП швидкості h_c та прискорення h_z коливань стрижня такими співвідношеннями:

$$h_z = -H\omega \sin \omega = H_z \sin \omega t, \quad (3.2)$$

$$h_c = H\omega \cos \omega = H_c \cos \omega t. \quad (3.3)$$

У процесі експериментальних досліджень вимірюються тільки амплітудні значення швидкості та прискорення коливань стрижня, для яких отримаємо:

$$H_c = Hn\omega, \quad (3.4)$$

$$H_z = -H_c\omega = Hn\omega^2. \quad (3.5)$$

Вимірювальний перетворювач 2 має значно менші габаритні розміри од генераторного і призначений для вимірювань амплітуд прискорень коливань стержня вібростенда.

Амплітуда вихідної напруги U_{III} обмотки вимірювального перетворювача 2 пов'язана з амплітудою прискорення H_z пересування стрижня 7, наступною залежністю:

$$U_{III} = S_{III} H_z, \quad (3.6)$$

де S_{III} – чутливість індукційного перетворювача ($S_{III} = 8.8$ мВ/мм).

3.1.2. Досліджуваний двоканальний п'єзоелектричний гравіметр

Досліджуваний ДПГ зображено на рис.3.5. Він розташований на робочому столику генератора механічних коливань ГМК-1. Чутливий елемент ДПГ працює на основі деформації стиснення-розтягування.

Під дією прискорення g_z сили тяжіння на ІМ виникає сила тяжіння, внаслідок дії якої ІМ переміщується на величину x :

$$x \equiv f(g_z). \quad (3.7)$$

Такий рух ІМ спричиняє стиснення або розтяг ПЕ і появу на його поверхні електричного заряду Q (явище прямого п'єзо ефекту), який прямо пропорційний g_z . У ДПГ вимірюється не заряд Q , а напруга U :

$$U \equiv \frac{Q(g_z)}{C_{ПЕ}}, \quad (3.8)$$

де $C_{ПЕ}$ – ємність ПЕ.

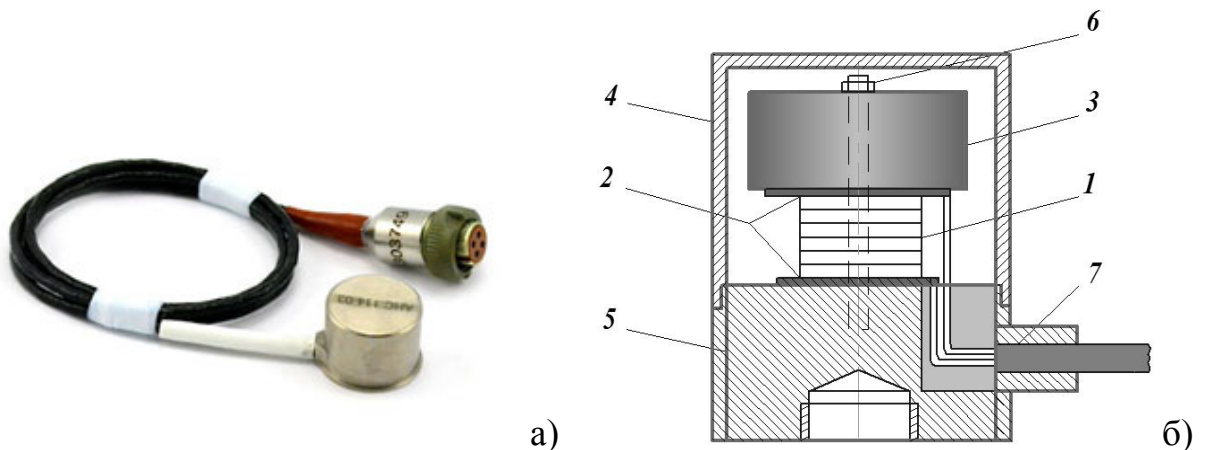


Рис. 3.5. Досліджуваний двоканальний п'єзоелектричний гравіметр: а) загальний вигляд; б) конструктивна схема: 1 – ПЕ; 2 – ізолятори; 3 – ІМ; 4 – основа; 5 – герметичний корпус; 6 – гвинт; 7 – кабель

3.1.3. Операційний підсилювач

Для підсилення вихідного аналогового сигналу з ДПГ використовуємо розроблений блок підсилення (рис. 3.6.).

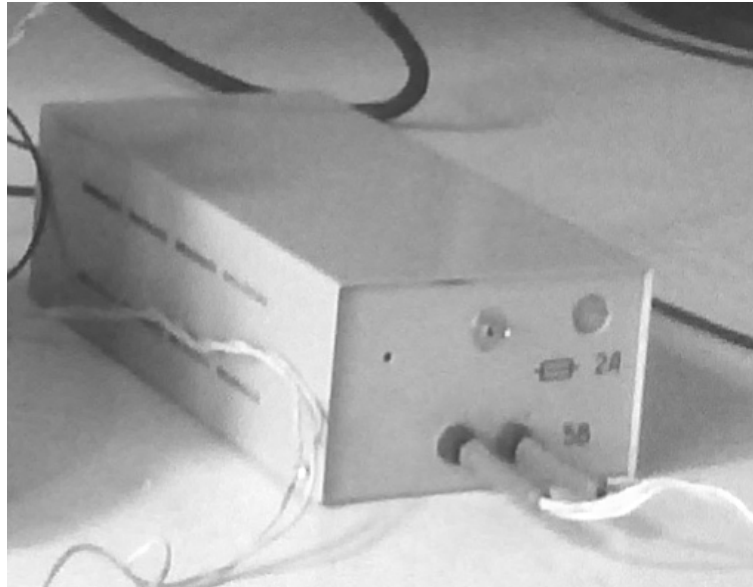


Рис. 3.6. Блок підсилення вихідного сигналу ДПГ

Основною складовою блоку підсилення є підсилювач INA116 [23] (рис.3.7) із застосуванням зведеного операційного підсилювача (ОП) A_1 із малим вхідним струмом і прецизійного ОП A_2 (рис.3.8). Така схема забезпечує ефективне придушення синфазної перешкоди (шумів) та забезпечує максимальну чутливість вимірювальної системи.

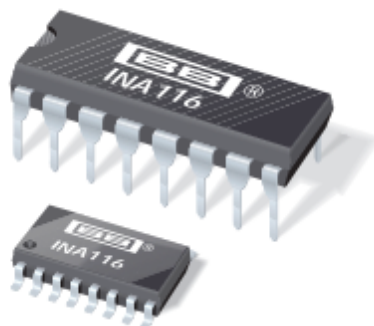


Рис. 3.7. Підсилювач INA116

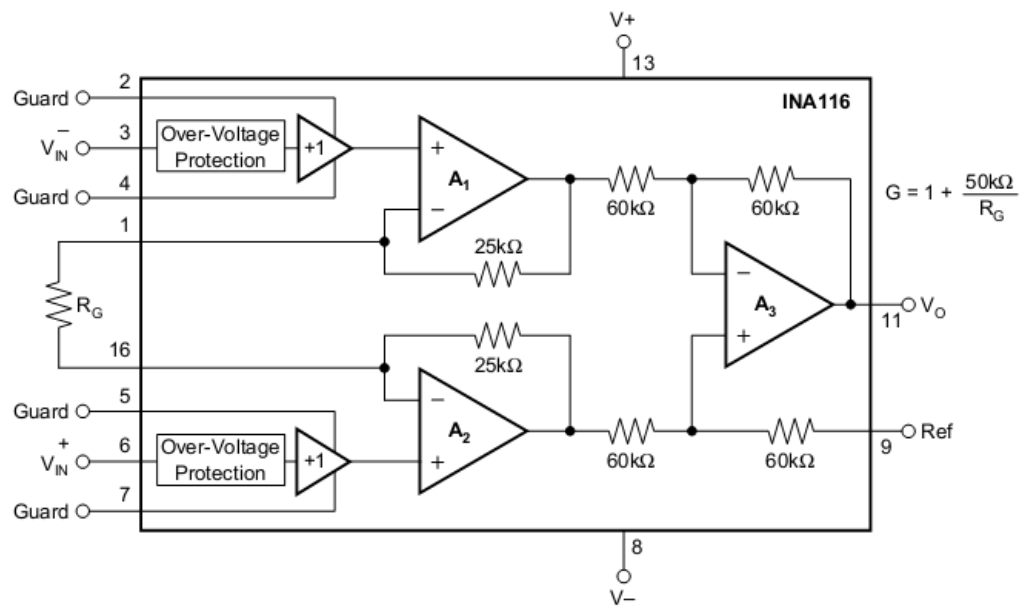


Рис. 3.8. Принципова електрична схема підсилювача INA116

Основні параметри, характеристики та рекомендації по експлуатації підсилювача INA116 наведені у [23].

Коефіцієнт підсилення розробленого блоку підсилення вихідного сигналу ДПГ дорівнює 1, а вихідна напруга 0–5 В.

3.1.4. Мікросистема збирання даних

1) *Розробка та аналіз роботи принципової електричної схеми вимірювально-реєстраційного пристрою.* Необхідно обрати АЦП послідовного наближення розрядністю не менше 10 біт, кількістю каналів – не менше 1, час перетворення – мінімальний. Розроблена принципова схема вимірювально-реєстраційного пристрою вихідного сигналу ДПГ представлена на рис.5.12. Вона побудована на основі АЦП послідовного наближення. Вимірюваний сигнал надходить на вхід даної мікросхеми і перетворюється нею у 12-розрядний двійковий код. Цей код передається по SPI-інтерфейсу керуючому пристрою. У ролі керуючого пристрою виступає мікроконтролер. Він виконує первинну обробку даних і передає їх мікросхемі перетворювача інтерфейсів для їх подальшої передачі через USB-порт до ЕОМ.

Вхідний підсилювач. АЦП здатний обробити будь-яку напругу в діапазоні від 0 до 5 В, але він може бути використаний і для перетворення навіть таких напруги, які не відповідають його робочому діапазону. Це забезпечується завдяки використанню саме вхідного підсилювача, який може мати коефіцієнт підсилення величиною 0.5 або 5, що забезпечить перетворення сигналів у діапазоні $0 \div 1$ і $0 \div 10$ В відповідно. Тобто, вхідний підсилювач із коефіцієнтом підсилення 5 дозволить виміряти напруги до 1 В із такою ж точністю, з якою сам АЦП оцифровує напруги до 5 В. При вхідному опорі 1 МОм підсилювач із посиленням 0.5 дозволить працювати на межі виміру “100В” з використанням звичайного дільника 1/10.

Джерело опорної напруги. Основне призначення джерела – створення зразкової напруги, яка могла б бути використана у якості еталону. Тому головна вимога до джерела опорної напруги – підтримка незмінної вихідної напруги.

Подвоювач напруги. Беручи до уваги допустимий вхідний діапазон джерела опорної напруги у межах $5 \div 40$ В, найбільш раціональним виявилось застосування схеми накачування заряду (charge-pump): подвоєння напруги на конденсаторах.

Мікроконтролер. 8-розрядний мікроконтролер, заснований на архітектурі Atmel AVR, виконує більшість інструкцій за 1 такт, тому його обчислювальна потужність дорівнює 1 MIPS на 1 МГц. Мікроконтролер має RISC-архітектуру, але формат команди двухоперандний, за один такт може бути звернення тільки до двох регістрів. Містить 32 регістра, які можуть рівноправно використовуватися в арифметичних операціях [24].

Перетворювач інтерфейсів. Сформовані мікроконтролером пакети мають передаватись на USB-перетворювач. Даний елемент необхідний, оскільки протокол обміну даними по USB складний з боку апаратних рішень і з боку програмного забезпечення.

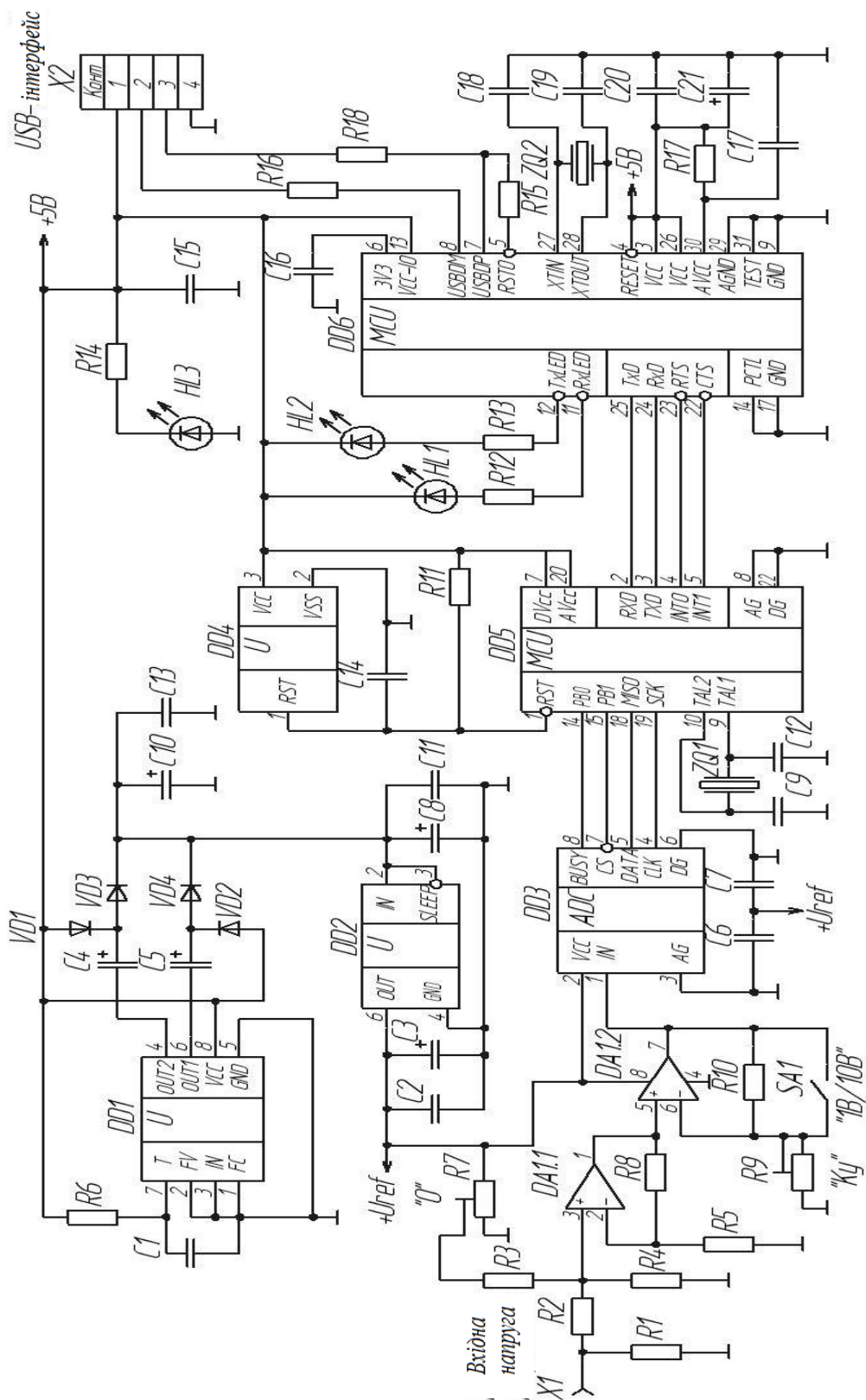


Рис. 3.12. Принципова електрична схема вимірювально-реєстраційного пристрою вихідного сигналу ДПГ

Супервізор живлення. Працездатність мікроконтролера гарантується при напругах живлення у діапазоні $4.5 \div 5.5$ В. Проте, як показує практика, мікроконтролер продовжує працювати навіть при зниженні напруги живлення до рівня 2,7 В. Такий режим є неприпустимим, оскільки порушується режим роботи тактового генератора. Все це може призводити помилкового вимірювання часових інтервалів, порушення швидкості передачі даних, втрати даних. Щоб цього уникнути, застосовують супервізори живлення. Цей пристрій підключають до ланцюга живлення мікроконтролера, а вихід – до інверсного входу RESET мікроконтролера. При падінні напруги живлення нижче установленого рівня супервізор генерує імпульс скидання (низький рівень на інверсному вході RESET), який зупиняє мікроконтролер, і утримує цей рівень, поки напруга не прийде в норму.

У якості модуля введення-виведення для лабораторної установки обрано мікросистему m-DAQ (рис.3.13), яка виконана у вигляді окремого пристрою у компактному корпусі з АВС пластика і повністю задовольняє умови розраховані вище. Кількість каналів дискретного введення-виведення модуля збільшено за рахунок зменшення числа каналів аналогового введення-виведення і збільшення числа контактів використовуваного роз'єму – дворядного штирьового з'єднувача IDC-34 [113].



Рис. 3.13. Мікросистема зібрання даних m-DAQ

Програмне забезпечення до m-DAQ містить драйвер, DLL-бібліотеку і приклади роботи з нею, *lib*-бібліотеку для середовища графічного програмування LabVIEW, і ряд віртуальних приладів – “осцилограф”, “аналізатор спектру”, “частотомір” і “вольтметр”.

Базова модель m-DAQ містить вісім каналів аналогового введення $A_{IN0} \dots A_{IN7}$. Кожен канал має індивідуальний вхідний буферний каскад, нормуючий підсилювач і найпростіший фільтр нижніх частот. Діапазони вхідних напруг $\pm 1V, \pm 2,5V, \pm 5V, \pm 10V, 0..5V$ і $0..10V$.

Аналого-цифровий перетворювач містить 8-канальний комутатор, власне сам 10-розрядний АЦП послідовного наближення, буфер FIFO і автомат управління, реалізований на основі мікроконтролера. Гарантоване максимальне значення частоти дискретизації в одноканальному режимі складає 200 кГц, у багатоканальному режимі – 100 кГц. Запуск АЦП здійснюється або від внутрішнього програмованого генератора, або від зовнішнього.

Живлення аналогових ланцюгів m-DAQ здійснюється напругою $\pm 15V$ від вбудованого DC/DC-перетворювача. І ці ж (+ V і -V) шини можуть бути використані для живлення зовнішніх пристроїв, наприклад нормалізаторів сигналів датчиків.

До EOM модуль введення-виведення підключається за допомогою роз'єму USB.

3.1.5. Програмне забезпечення

Програмне забезпечення для експериментального дослідження характеристик ДПГ, тобто відображення вихідного сигналу ДПГ на EOM, розроблене на платформі LabVIEW і має вигляд віртуального осцилографа (рис.3.14).

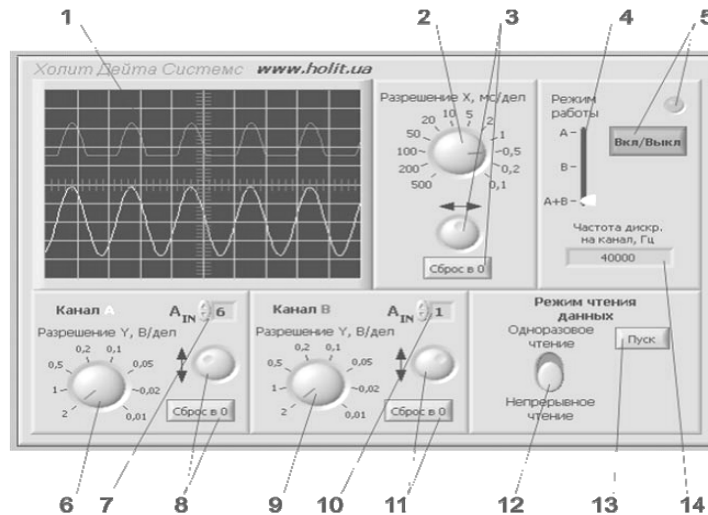


Рис. 3.14. Інтерфейс програмного забезпечення: 1 – екран для осцилограм; 2 – горизонтальна розгортка; 3 – горизонтальне зміщення променів; 4 – перемикач режимів роботи; 5 – індикатор живлення приладу; 6 – вертикальна розгортка каналу А; 7 – поле задання номера входу для каналу А; 8 – вертикальне зміщення променя А; 9 – вертикальна розгортка каналу В; 10 – поле задання входу для каналу В; 11 – вертикальне зміщення променя каналу В; 12 – неперервний режим; 13 – запуск набору даних; 14 – поле частоти дискретизації

3.2. Експериментальні дослідження характеристик п'єзоелектричного гравіметра

Для експериментальних досліджень обрано п'єзоакселерометр АНС 114-08 [26], який має власну частоту $\omega_0 = 0.1$ рад/с, яку забезпечено шляхом збільшення сумарного опору ($\tau = 1/C_\Sigma R_\Sigma$).

1) Проводимо дослідження залежності амплітуди вихідної напруги, яку знімаємо з ДПГ $U_{ДПГ}$ від частоти ω коливань вібростенда для амплітуди напруги з генератора $U_{ген} = 5, 7, 8$ В. Отримані експериментальні дані занесемо у табл.3.1. Відповідно до даних табл.3.1 будемо графіки залежностей $U_{ДПГ} = \psi(\omega)$ та для $U_{ген} = 5, 7, 8$ В (рис.3.15).

**Залежність вихідної напруги ДПГ від частоти коливань вібростенда
при різних напругах збудження**

ω , рад/с		0.01	0.033	0.05	0.1	0.15	0.20	0.25	0.28	0.30	0.35
U _{ДПГ} , мВ	при U _{ген} = 5В	52.4	56.7	74	121.9	53.8	87	89.6	6.1	40.0	9.8
	при U _{ген} = 7В	71	75.5	107.1	174.1	70.7	125.8	113	10.8	72.6	13.2
	при U _{ген} = 8В	79	81.3	118	192	77.8	154.6	143	14	65.2	17

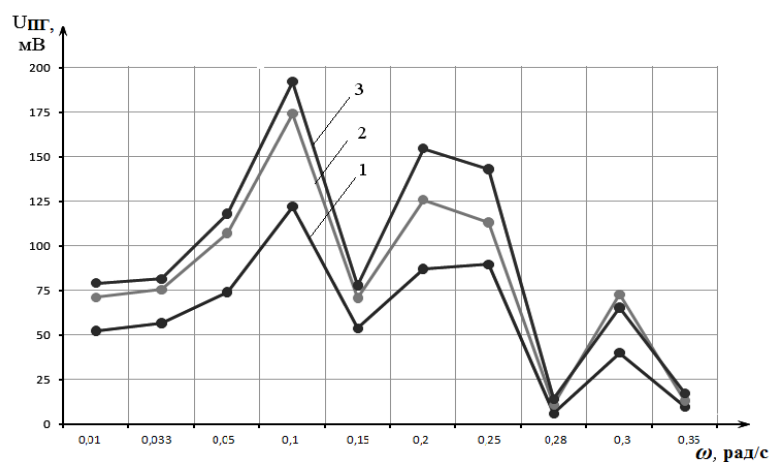


Рис.3. 15. Залежність вихідної напруги ДПГ від частоти коливань вібростенда при різних напругах збудження: 1 - $U_{ДПГ}=\psi(\omega)$ при $U_{ген} = 5В$; 2 - $U_{ДПГ}=\psi(\omega)$ при $U_{ген} = 7В$; 3 - $U_{ДПГ}=\psi(\omega)$ при $U_{ген} = 8В$

Із табл.3.1 та графіків на рис.3.15 видно, що максимальна амплітуда вихідної напруги досліджуваного ДПГ має місце при значеннях частоти коливань вібростенда $\omega = 0.1$ рад/с для $U_{ген} = 5 В$; $U_{ген} = 7 В$; $U_{ген} = 8 В$, що

дорівнює частоті власних коливань досліджуваного ДПГ ($\omega = \omega_0 = 0.1$ рад/с). Це випадок так званого “головного резонансу”. Цей висновок співпадає із висновками аналітичного дослідження та дослідження на ЕОМ.

Зі збільшенням частоти коливань вібростенда напруга $U_{\text{ДПГ}}$ зменшується. Експериментально отриманий хід характеристики $U_{\text{ДПГ}} = \psi(\omega)$ підтверджується формулою [12] $U_{\text{ПГ}} = \frac{k_1 k_2 F_x}{\omega S_x}$, де $k_1 = d_{ij}$ – п’єзомодуль, а k_2 – коефіцієнт пропорційності ніобату літію.

2) Проводимо дослідження залежності амплітуди вихідної напруги індукційного перетворювача (ІП) $U_{\text{ІП}}$ від частоти ω коливань вібростенда для амплітуди напруги з генератора $U_{\text{ген}} = 5, 7, 8$ В. Отримані експериментальні дані занесемо до табл.3.2 та побудуємо графіки залежностей $U_{\text{ІП}} = \psi(\omega)$ для $U_{\text{ген}} = 5, 7, 8$ В (рис.3.16).

Таблиця 3.2

Залежність вихідної напруги ІП від частоти коливань вібростенда при різних напругах збудження

ω , рад/с		0.01	0.033	0.05	0.1	0.15	0.20	0.25	0.28	0.30	0.35
$U_{\text{ІП}}$, В	при $U_{\text{ген}} =$ 5В	2.120	1.820	1.780	1.782	1.786	1.785	1.779	1.784	1.782	1.787
	при $U_{\text{ген}} =$ 7В	2.480	1.920	1.850	1.830	1.829	1.822	1.821	1.818	1.819	1.813

	при										
	$U_{\text{ген}} =$	2.50	2.250	2.240	2.230	2.230	2.240	2.240	2.240	2.240	2.240
	8В										

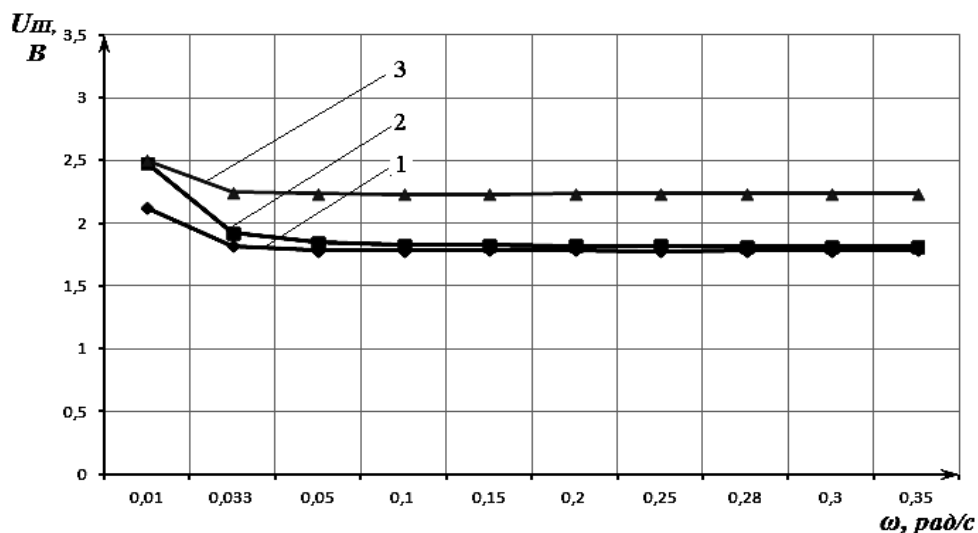


Рис.3.16 Залежність амплітуди вихідної напруги ІП від частоти коливань вібростенда при різних напругах збудження: 1 – $U_{III} = \psi(\omega)$ при $U_{\text{ген}} = 5\text{В}$; 2 – $U_{III} = \psi(\omega)$ при $U_{\text{ген}} = 7\text{В}$; 3 – $U_{III} = \psi(\omega)$ при $U_{\text{ген}} = 8\text{В}$

Із графіків на рис.3.16 робимо висновок, що U_{III} не залежить від частоти коливань вібростенда та прямо пропорційне $U_{\text{ген}}$. Також встановлено, що у зоні $\omega \leq 0.033$ рад/с є відхилення від лінійності характеристики, обумовлене технологічними похибками виготовлення вимірювального перетворювача.

Отримано рівняння для визначення аномалії за допомогою ДПГ АГС, яке має вигляд:

$$\begin{aligned}
\Delta \bar{g} = & K_{III} \left[\frac{x(t_2) - x(t_1)}{t_2 - t_1} \right] + \frac{1}{t_2 - t_1} \left(\frac{\bar{v}^2}{r} \left\{ 1 - 2e \cdot \left[1 - \cos^2 \bar{\varphi} \cdot \left(1 - \frac{\sin^2 \bar{k}}{2} \right) \right] \right\} + \right. \\
& + 2\omega_3 \bar{v} \sin \bar{k} \cos \bar{\varphi} - 2\bar{h} \frac{e}{r} \bar{v} \cos \bar{k} \sin 2\bar{\varphi} \left. \right) + \frac{1}{t_2 - t_1} \left(2 \frac{\bar{\gamma}_0 \bar{h}}{r} + \omega_3^2 \bar{h} \cos^2 \bar{\varphi} \right) - \\
& - \frac{1}{t_2 - t_1} \gamma_{0e} (1 + 0.0052884 \sin^2 \bar{\varphi} - 0.0000059 \sin^2 2\bar{\varphi}),
\end{aligned} \tag{3.9}$$

де $\Delta\bar{g}$, \bar{v} , $\bar{\varphi}$, \bar{k} , \bar{h} , $\bar{\dot{h}}$ – параметри, обчислені за інтервал усереднення (t_2-t_1) , або усереднені параметри.

Таким чином, отримано рівняння (3.9) для визначення аномалії Δg за допомогою ДПГ, яке може бути використане, як робоче при проведенні аерогравіметричних вимірювань.

3.3. Усереднення даних про аномалії прискорення сили тяжіння

Рівняння руху (3.9) авіаційної гравіметричної системи містить усереднені значення поправки Етвеша \bar{E} , поправки за висоту \bar{A} , вертикальної швидкості $\bar{\dot{h}}$ та питомої сили f_z . При польотах на ІЛ-18 усереднення $\Delta\bar{g}$ здійснювали на кожній лінії льоту [2].

Поправка Етвеша. Як показано у [2], поправка Етвеша змінюється швидше для північно-південних (тобто меридіональних) маршрутів, і повільніше – для східно-західних маршрутів (тобто маршрутів уздовж паралелі). Цю обставину було враховано для редукції даних.

У разі північно-південних польотів, коли E змінюється набагато швидше, залежно від курсу літака проводили усереднення за 15-секундні інтервали.

У разі східно-західних польотів E обчислювали шляхом усереднення значень за 30-секундні інтервали.

Усереднені за певні інтервали часу значення \bar{E} підставляють у рівняння (3.9) для обчислення аномалій прискорення сили тяжіння $\Delta\bar{g}$.

Поправка за висоту. Усереднені поправки за висоту $\bar{A}(t_1, t_2)$ обчислюють за навігаційними даними. Поправка за висоту \bar{A} , як і поправка Етвеша \bar{E} , змінюється повільно і для всіх польотів достатньо задовільно використовувати середнє значення \bar{A} , обчислене за 30-секундні інтервали.

Варіації поправки за висоту \bar{A} звичайно такі малі (менші за 30 мГал), що використання кінцевих точок інтервалів замість інтервалів для обчислення \bar{A} зумовило в найгіршому випадку похибку 1/8 мГал за 1 годину польоту.

Усереднені за інтервали часу значення \bar{A} підставляють у рівняння (3.9) для обчислення аномалій прискорення сили тяжіння.

Вертикальна швидкість. При експериментальних гравіметричних вимірюваннях з ДПГ не враховувався $\dot{h}(t)$ у рівнянні у зв'язку з тим, що, по-перше, вимірювання проводяться на Землі, а по-друге, завдяки використанню ПЕ у якості фільтра низьких частот, похибка визначення $\Delta\bar{g}$, спричинена вертикальним прискоренням, не перевищує 1 мГал.

Прискорення сили тяжіння. В цьому разі використовують найкоротші інтервали часу $t_2 - t_1$. Усереднені значення питомої сили f_z підставляли у рівняння руху (5.11) для обчислення аномалій ПСТ $\Delta\bar{g}$.

Усереднені значення питомої сили \bar{f}_z підставляли у рівняння руху (3.9) для обчислення аномалій ПСТ $\Delta\bar{g}$.

Вихідний сигнал ДПГ реєстрували 50 разів за 50 с, решту параметрів (широта, курс, довгота, швидкість, висота) вимірювали також за 50 с.

Для знайдення остаточних (підсумкових) даних про аномалії ПСТ, згідно з рівнянням (3.9), використовували метод інтерполяції.

3.4. Градувальна характеристика п'єзоелектричного гравіметра

Градування – це метрологічна операція, за допомогою якої засіб вимірювань (міра або вимірювальний прилад) забезпечується шкалою або градувальною таблицею (кривою). Для цього використаємо установку (рис.3.17), яка складається із оптичної ділильної головки 1, ДПГ 2, встановленого на кронштейні 3, блоку підсилення 4, модуля введення-виведення 5 та ЕОМ 6.

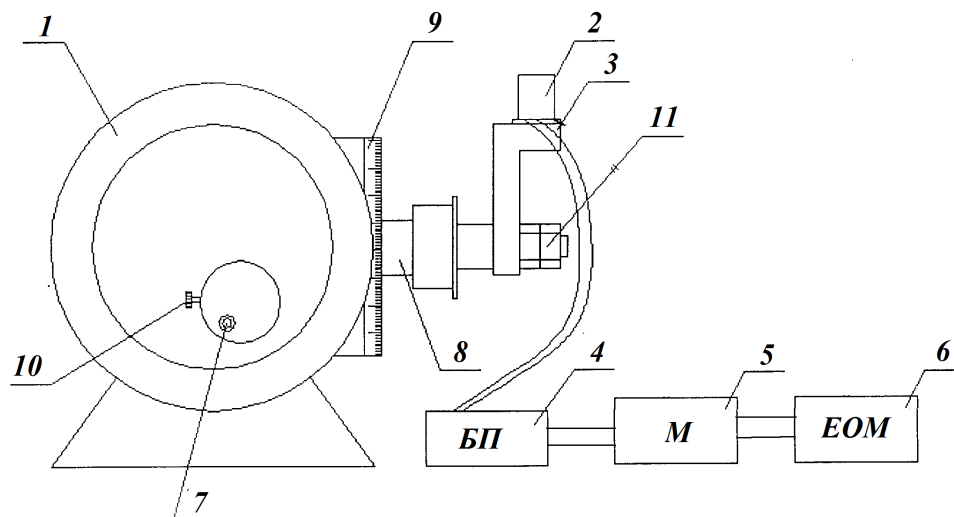


Рис. 3.17. Експериментальна установка для градуювання ДПГ: 1 – оптична ділильна головка; 2 – ДПГ; 3 – кронштейн; 4 – блок підсилення; 5 – модуль введення-виведення; 6 – ЕОМ; 7,10 – поворотні ручки; 8 – вал; 9 – відлікова шкала; 11 – прижимні гайки

Градування ДПГ відбувається при нахиленні його вимірювальної осі OZ за допомогою оптичної ділильної головки на деякий кут α_z (рис.3.18). Градування ДПГ реалізується за допомогою поворотної ручки 7 оптичної ділильної головки 1. При цьому повертається вал 8, кронштейн 3, а також закріплений на кронштейні ДПГ 2. Кут повороту α_z керується по відліковій шкалі 9. Вихідний сигнал ДПГ 2 відображається на ЕОМ 6.

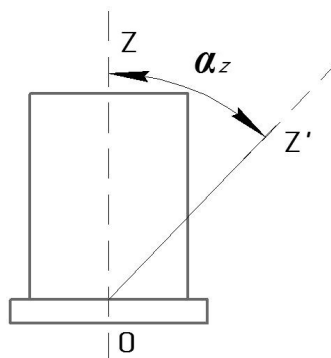


Рис.3.18. Кут нахилу ДПГ АГС

Отримані результати $g_{zЕКСП}$ градуювання ДПГ експериментальним шляхом відобразимо у табл.3.3 та порівняємо їх із аналітичними розрахунками ($g_{zТЕОР} = g \cdot \cos \alpha_z$). Побудуємо графіки залежностей сигналу ДПГ g_z від кута повороту α_z (рис.3.19).

Таблиця 3.3

Градуювальна таблиця ДПГ АГС

№	α_z , град	$g_{zЕКСП}$, мГал	$g_{zТЕОР}$, мГл	Відхилення експ. від теор. по модулю, мГал	Відхилення від поточного значення, %
1	0	981100.375	981100.376	0.001	0
2	10	966195.234	966195.257	0.023	1.52
3	20	921932.665	921932.784	0.119	6.03
4	30	849658.072	849657.849	0.223	13.39
5	40	751566.893	751566.491	0.402	23.40
6	50	630639.662	630639.161	0.501	35.72
7	60	490549.470	490550.188	0.718	50.01
8	70	335556.981	335556.091	0.890	65.79
9	80	17365.725	17364.818	0.907	98.23
10	90	0	0	0	100

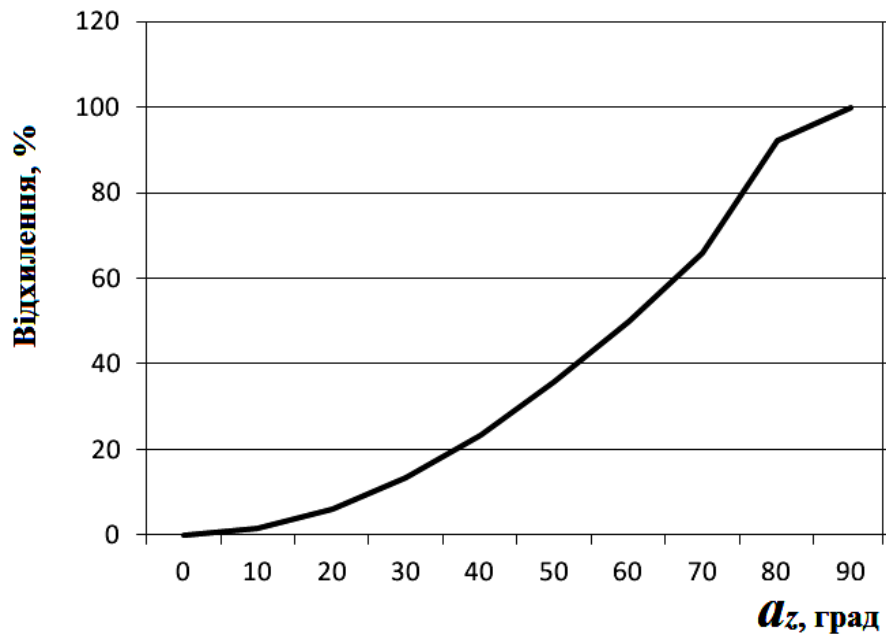


Рис.3.19. Графік залежності відхилення вимірювальної осі ДПГ α_z від відхилення від поточного значення прискорення сили тяжіння

Як бачимо із табл.3.3, різниця між відхиленнями вимірювальної осі ДПГ автоматизованої АГС на кут α_z обчисленими аналітично та отримані експериментально не перевищує 1 мГал. Кут повороту його вимірювальної осі відносно довідкової вертикалі впливає прямо пропорційно на його вихідні покази та величину його похибки.

Оскільки гравіметричні вимірювання проводяться на рухомій у просторі основі, тому необхідно постійно забезпечувати збіг вимірювальної осі ДПГ АГС із довідковою вертикаллю. Для реалізації цього процесу запропоновано побудувати систему стабілізації АГС, яка забезпечує рівень допустимої похибки стабілізації осі чутливості ДПГ у положення вертикалі у межах 0.5–15 кут. хв. [п. 1.6].

3.5. Визначення базових параметрів роботи макету

Установка розташована в НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, GPS координати якого: довгота: 28.637409^0 ; широта: 50.244460^0 .

За цими координатами, згідно [26]:

$$\gamma_0 = \gamma_{0e} (1 + 0.0052884 \sin^2 \varphi - 0.0000059 \sin^2 2\varphi),$$

знаходимо довідкове значення прискорення сили тяжіння $\gamma_{ЖДТУ}$:

$$\begin{aligned} \gamma_{ЖДТУ} = & 9.78049(1 + 0.0052884 \sin^2 (50.244460) - \\ & - 0.0000059 \sin^2 (2 \cdot 50.244460)) = 9.81100376 \text{ м/с}^2. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Досліджуваний гравіметр встановлювався вертикально. Випробування проводились на вібростенді, зображеному на рис. 3.3.

3.6. Проведення експерименту

Дані, які фіксувались й оброблювались у ЕОМ, а також результати їх обробки представлені у табл. 3.4. Через приблизно 50 с спостереження проводилась обробка на ЕОМ.

Розраховано для кожного випадку систематичну похибку Δ_g :

$$\Delta_g = \left| \overline{g_{експ}}(t) - \gamma_{ЖДТУ} \right|, \quad (3.11)$$

де $\overline{g_{експ}}(t)$ – середнє значення вихідного сигналу ДПГ отримане у ході експерименту за період спостереження 50 с:

$$\overline{g_{експ}}(t) = \frac{1}{N_{експ} + 1} \sum_{i=0}^{N_{експ}} \overline{g(t_i)}, \quad (3.12)$$

де $N_{експ}$ – кількість вимірів за 50 с; $g(t_i)$ – i -те значення вихідного сигналу ДПГ.

Абсолютна похибка експериментальних вимірювань $\Delta_{g_{експ}}$:

$$\Delta_{g_{експ}} = \frac{\sigma_{g_{експ}}}{\sqrt{N_{експ}}} t_p;$$

$$\sigma_{g_{експ}} = \sqrt{\frac{1}{N_{експ}} \sum_{i=0}^{N_{експ}} [\overline{g(t_i)} - \overline{g_{експ}}]^2}; \quad (3.13)$$

$$t_p = qt(p, d),$$

де $\sigma_{g_{експ}}$ – середньоквадратичне відхилення $\overline{g_{експ}(t)}$; $t_p = qt(p, d)$ – коефіцієнт оберненого розподілу Стюдента за довірчою імовірністю p та числом ступенів вільності $d = N_{експ}$.

Таблиця 3.4

Похибки ДПГ, зумовлені вібраціями основи при $p=0,90$

ω , рад/с	$\overline{g_{експ}(t)}$, мГал	$\Delta_{g_{експ}}$, мГал	Δ_g , мГал
0	981100.3761	0.001136	0.00006001
0.5	981103.2946	0.006184	2.91861022
1.0	981103.4298	0.048067	3.05381611
5.0	981105.7721	0.581020	5.39611120
10.0	981108.9362	0.851001	8.89863610
30.0	981113.4471	2.764100	13.0710563

З табл. 3.4 встановлено, що:

– при нульових установках вібростенду вихідний сигнал ДПГ співпадає з довідниковим значенням ПСТ $\Delta_g = 0.00006$ мГал;

– для поступальних вібрацій вібростенду до 10 рад/с ДПГ забезпечує точність вимірювань $\Delta_{g_{експ}} \leq 1$ мГал.

Згідно з [1, 4] та результатами моделювання, резонансний режим може виникати на частотах: $\omega_0 = 0.033; 0.05; 0.1; 0.2; 0.3$ рад/с. Спектр збурюючих вібраційних поступальних прискорень на ЛА має максимум на частоті 1640 рад/с. Тому на нижчих резонансних частотах амплітуди вібраційних поступальних збурюючих прискорень менші. Методику обробки результатів не змінювали. Результати наведені у табл. 3.5. З табл.3.5 робимо висновок, що навіть при найнесприятливіших резонансних режимах роботи ДПГ забезпечує точність $\Delta_{g_{експ}} = 1$ мГал.

Таблиця 3.5

Похибки ДПГ, зумовлені резонансними режимами роботи

ω , рад/с	$\overline{g_{експ}}(t)$, мГал	$\Delta_{g_{експ}}$, мГал	Δ_g , мГал
0	981100.3761	0.001136	0.000060
0.033	981100.5046	0.191160	0.128636
0.05	981100.5798	0.378130	0.203863
0.1	981101.1799	0.962309	0.803863
0.2	981101.5961	0.411891	1.220125
0.3	981102.4886	0.384961	2.112581

Встановлено, що результати експериментальних досліджень співпадають із результатами цифрового моделювання (рис. 3.20).

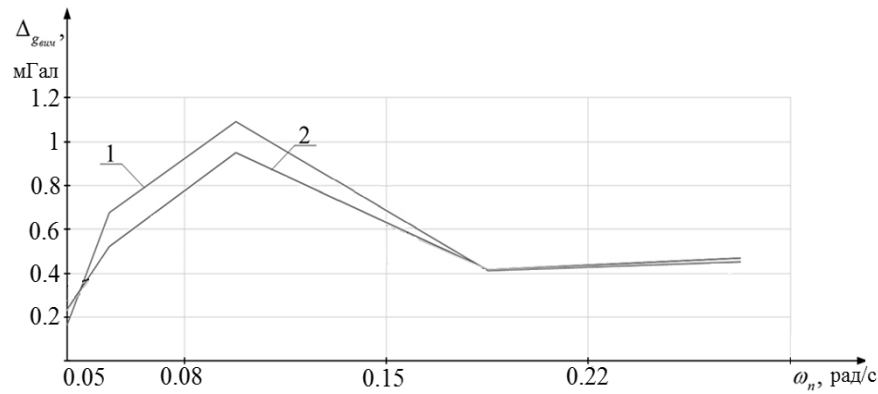


Рис.3.20. Результати порівняння цифрового моделювання та експерименту:

1 – цифрове моделювання; 2– експеримент

3.7. Визначення метрологічних характеристик п'єзоелектричного гравіметра

За відсутності лінійних та кутових вібрацій, ДПГ може функціонувати як наземний гравіметр. Теоретична та експериментальна оцінка похибки ДПГ за відсутності збурень є 0.00006 мГал.

Отже, статична характеристика ДПГ, як наземного гравіметра:

$$\bar{g}_{ПГ} = \overline{g_{експ}} \mp 6 \cdot 10^{-5} \text{ мГал.} \quad (3.14)$$

За наявності динамічних збурень, ДПГ функціонує як гравіметр АГС із точністю:

$$\bar{g}_{ПГАГС} = \overline{g_{експ}} \mp 1 \text{ мГал.} \quad (3.15)$$

Відносна похибка ДПГ АГС:

$$\delta_g = \frac{\Delta_g}{g_{експ}} \cdot 100\% = \frac{1}{981100.37556} \cdot 100\% = 1.019 \cdot 10^{-4}\%. \quad (3.16)$$

ДПГ у складі АГС реєструє зміну аномалії Δg у реальному часі та обмежується лише можливостями сучасних ЕОМ. Тому його швидкодія достатньо висока.

Умови експлуатації ДПГ АГС: температура навколишнього середовища $(-20...+50) ^\circ\text{C}$; атмосферний тиск $(90000...110000)$ Па; відносна вологість $50 \pm 25\%$;

Клас точності ДПГ АГС: у лабораторних умовах абсолютна похибка ДПГ склала $\Delta_g = 0.00006$ мГал, а на ЛА абсолютна похибка становить 1 мГал, що відповідає найвищому класу точності.

3.8. Висновки до розділу 3

3.8.1. Розроблено лабораторну установку та сформульовано основні положення методики проведення експериментальних досліджень ДПГ.

3.8.2. У результаті проведених експериментальних досліджень отримано залежності амплітуди вихідної напруги ДПГ та індукційного перетворювача від частоти коливань вібростенда. Встановлено, що максимальна амплітуда вихідної напруги ДПГ $U_{ДПГ}$ має місце при значеннях частоти коливань вібростенду, що дорівнює частоті власних коливань ДПГ. Це випадок так званого “головного резонансу”. Також зі збільшенням частоти коливань вібростенда напруга $U_{ДПГ}$ зменшується.

3.8.3. Побудовано градувальну характеристику ДПГ АГС та встановлено, що кут повороту вимірювальної осі ДПГ АГС відносно довідкової вертикалі впливає прямо пропорційно на його вихідні покази та величину його похибки.

3.8.4. Експериментально визначено похибку ДПГ у лабораторних умовах, яка становить 0,00006 мГал, що співпадає із результатами цифрового моделювання .

3.8.5. Експериментально встановлено, що у найнесприятливіших резонансних умовах, $\omega=\omega_0=0,1 \text{ рад/с}$, $\omega=2\omega_0$, $\omega=3\omega_0$, $\omega=\omega_0/2$, $\omega=\omega_0/3$ ДПГ забезпечує точність вимірювань 1 мГал.

3.8.6. Встановлено, що систематична похибка ДПГ максимальна при $\omega=3\omega_0=0.3 \text{ рад/с}$ і не впливає на точність вимірювань.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА САРТАП-ПРОЕКТУ “СТАБІЛІЗАТОР ОЗБРОЄННЯ ЛЕГКОЇ БРОНЬОВАНОЇ ТЕХНІКИ”

Розглянувши в попередніх розділах математичну та механічну модель двоканально п'єзоелектричного гравіметра та обрахувавши його основні електричні параметри, можемо зробити висновок, що одним з найбільш вдалих методів. В цьому розділі буде проведено аналіз стартап проекту вдосконаленого стабілізатора озброєння з використанням двоканального п'єзоелектричного гравіметра в якості чутливого елемента.

4.1.Опис ідеї проекту

Ідеєю для стартап-проекту є вдосконалений стабілізатор озброєння легкої броньованої техніки з використанням описаного в магістерській дисертації двоканального п'єзоелектричного гравіметра. Актуальність такого стабілізатора полягає в значному підвищенні вимог до надійності, швидкодії та точності систем наведення та стабілізації озброєння, а також можливість експлуатації в складних умовах. Також необхідним є зниження витрат часу та коштів на технічне обслуговування. В умовах сучасного стану українського виробництва легкої броньованої техніки ключовою проблемою є проблема ресурсу конструкцій, особливо при наявності значного парку старіючої військової техніки. За досвідом воєнних конфліктів, наслідком використання малоефективних систем стабілізації є значна частина втрат парку броньованої техніки.

Саме тому вдосконалення експлуатаційних характеристик систем стабілізації озброєння легкої броньованої техніки є важливою задачею, вирішення якої забезпечує навігаційну безпеку України. Опис ідеї стартап-проекту наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Вдосконалений стабілізатор легкої броньованої техніки	Стабілізація наведення та супроводу в горизонтальній та вертикальній площинах наземних, повітряних та наводних цілей для ефективної стрільби з місця, на ходу та на плаву.	Користувачами можливе використання стабілізатора в системах управління вогнем бойового модуля “Шквал” для БТР-3Е та БМП-1М, а також бойових модулів “Штурм” та “Парус” для БТР-3Е1 та БМП-2.
	Управління рухом озброєння і режимами роботи в цифровому вигляді на сучасній елементній базі і обмін інформацією між цифровими блоками управління і пультами управління стрільбою по цифровому інтерфейсу.	Налаштування параметрів стабілізатора здійснюється оператором безпосередньо від пульта керування стрільбою без маніпуляцій регулювальними елементами на блоках управління.

Серед конкурентів для даного стабілізатора, в Україні існує лише два: СВУ-500-3Ц и СВУ-500-4Ц, які виготовляє ПАТ "НВО «Київський завод автоматики» — підприємство оборонного комплексу України в місті Київ. Вдосконалений стабілізатор легкої броньованої техніки відрізняється від зазначених стабілізаторів СВУ-500-3Ц и СВУ-500-4Ц легких бронемашин реалізацією законів управління рухом озброєння і режимами роботи в цифровому вигляді на сучасній елементній базі і обмін інформацією між цифровими блоками управління і пультами управління стрільбою по цифровому інтерфейсу. Інформація про режими роботи та справності стабілізатора відображається на цифровому дисплеї пульта управління у буквеному та цифровому вигляді.

Далі проводимо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів:

- визначаємо перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;

- визначаємо попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводимо збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для

ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;

– проводимо порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко- економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральн а сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	СВУ-500- 3Ц	СВУ-500- 4Ц			
1.	Портативність	50 кг	68 кг	65 кг	-	-	+
2.	Вартість	низька	низька	низька	-	-	+
3.	Точність (кутові хвилини)	3,6	4,8	5,2	-	-	+
4.	Загальний строк служби	17 років	20 років	20 років	+	-	-

За рахунок оптимізації схемо-технічних рішень та законів управління у вдосконаленому стабілізаторі був скорочений приладовий склад (виключені компенсаційний гіротахометр та окремий блок фільтрів) та зменшена загальна маса, габарити стабілізатора. Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу буде проведено аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту.

Визначення технологічної здійсненості ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (табл.4.3):

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/доробити?
- чи доступні такі технології авторам проекту?

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Вдосконалення стабілізатора за допомогою скорочення приладового складу	Скорочення приладового складу стабілізатора (виключення компенсаційних гіротахметрів та окремого блоку фільтрів)	Наявні	Доступні
2	Вдосконалення стабілізатора за допомогою двоканально п'єзоелектричного гравіметра	Заміна приладового складу стабілізатора (заміна компенсаційних гіротахметрів на двоканальні п'єзоелектричні)	Наявні	Доступні
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: обрано технологію вдосконалення стабілізатора за допомогою двоканального п'єзоелектричного гравіметра.				

За результатами аналізу таблиці можна зробити висновок щодо можливості технологічної реалізації проекту стабілізатора легкої броньованої техніки, а також технологічний шлях, яким це доцільно зробити.

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначимо ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміку розвитку ринку (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	2
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	10000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	20

Інвестувати грошові засоби доцільно тоді, коли від цього можна отримати більший прибуток, ніж від їх зберігання у банку. Порівнюючи середньорічну рентабельність інвестицій зі ставкою банківського відсотка, можна дійти висновку, що вигідніше.

З даної таблиці можна зробити висновок, що ринок є привабливим для входу за попереднім оцінюванням.

Далі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 4.5).

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	Підвищення обороноздатності країни	Державний концерн “Укроборонпром”, а також закордонні фірми-виробники озброєння.	Для закордонних клієнтів важливим показником є швидкодія та можливість вдосконалення. Для вітчизняних – ціна та надійність.	Висока точність, надійність та швидкодія стабілізатора. Відносно низька вартість та портативність.

Після визначення потенційних груп клієнтів проведемо аналіз ринкового середовища: складемо таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. 4.6–4.7).

Таблиця 4.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція	Очікується вихід на ринок крупної іноземної компанії-конкурента.	Робити акцент на відносно низькій вартості виготовлення компонентів та їх транспортування.
2	Збут	Найбільший оптовий покупець визначає постачальників за результатами тендеру.	На ринку з'явилася нова роздрібна сітка, яка в даний момент обирає постачальників.

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Ексклюзив	Виведення на ринок нового виду стабілізатора легкої броньованої техніки.	Підвищення потужності виробництва та проведення рекламної кампанії щодо підтримки вітчизняного виробника.
2	Збут	Підвищення обороноздатності країни, збільшення попиту.	Активна участь у міжнародних спеціалізованих виставках з озброєння, конференціях, активна рекламна кампанія.

З даної таблиці можна зробити висновок, що на даний момент, вихід на ринок є привабливим, оскільки з підвищенням обороноздатності країни активно зростає попит на нове, вдосконалене, більш ефективне озброєння для армії. Однак необхідно зважати на конкуренцію з закордонними виробниками, тому активна участь у виставках та конференціях та активна рекламна кампанія є необхідними складовими виведення даної технології на ринок. Далі проведемо аналіз пропозиції: визначимо загальні риси конкуренції на ринку (табл. 4.8).

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції - чиста конкуренція	1) різноманітність товарів та послуг; 2) важливе значення має не тільки ціна, а й нецінові чинники (умови продажу, можливість товари в кредит, гарантія, реклама і т. д.); 3) легкий вхід та вихід фірми з ринку	Мати деяке різноманіття товарів ; проводити рекламні кампанії
2. За рівнем конкурентної боротьби - світовий	Використання стабілізаторів озброєння є розповсюдженим у світі явищем, тому системи для їх контролю необхідні у світовому масштабі	Розробка якісного і досить дешевого продукту та міжнародна реклама
3. За галузевою ознакою - внутрішньогалузева	Стабілізатори озброєння легкої броньованої техніки застосовуються лише в галузі військового машинобудування	Розробка стендів для контролю напівпровідникових пристроїв
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Існує велике різноманіття закордонних розробок стабілізаторів озброєння	Підвищення якості та зменшення вартості стабілізатора
5. За характером конкурентних переваг - нецінова	Головним фактором є точність, швидкодія та надійність стабілізатора	Підвищення якості виробу
6. За інтенсивністю - не марочна	Роль торгової марки незначна, хоча самі марки можуть бути присутніми на ринку	Реклама продукції

За даними таблиці можна зробити висновок, що вхід на ринок буде не важким, адже конкуренція чиста, виробника обирають за допомогою проведення тендерів. Важливе значення має ціна та нецінові чинники (точність, швидкодія, надійність), саме це дає перевагу перед закордонними розробками, що як правило, дорожчі. Використання стабілізаторів озброєння є розповсюдженим у світі явищем, тому системи для їх контролю необхідні у світовому масштабі. Для цього необхідна участь у міжнародних виставках, конференціях та конкурсах, проводити рекламні кампанії.

Після аналізу конкуренції проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю 5 сил М. Портера) (табл. 4.9).

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Розробки "НВО «Київський завод автоматики»"	Фірма "Berco"	Україна, Китай	Збройні сили України	Немає
Висновки	Немає високої конкуренції, адже це державні установи, які не ведуть агресивної конкуренції	- є можливості входу в ринок - є потенційні зарубіжні конкуренти	Ні, постачальники лише впливають на ціну продукту	Так, необхідний якісний та точний виріб	Ні, оскільки замінників даного виробу немає

За результатами аналізу таблиці можна зробити висновок, що високої конкуренції у даній галузі немає, адже основні виробники подібного обладнання – державні установи, що не ведуть агресивної конкуренції. Роль постачальників вкрай важлива, однак від них залежить лише кінцева вартість виробу. Також робимо висновок, що замінників даного типу обладнання немає.

На основі аналізу конкуренції, проведеного в (табл. 4.9), а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 4.2), вимог споживачів до товару (табл. 4.5) та факторів маркетингового середовища (табл. 4.6–4.7) визначено та обґрунтовано перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз оформлено за табл. 4.10.

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл.4.10) проведемо аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 4.11).

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Швидкодія та точність стабілізатора	Головними показниками якості стабілізаторів озброєння легкої броньованої техніки беззаперечно є точність та швидкодія, адже саме ці фактори забезпечують навігаційний захист.
2	Низька ціна	Для великих державних тендерних закупівель важливим фактором є вартість виробу, саме тому відносно низька ціна є беззаперечною перевагою перед закордонними виробниками та постачальниками.

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 4.12) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 4.11).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «імпульсного імітатора сонячного випромінювання»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з імпульсним імітатором						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Швидкодія та точність стабілізатора	17						+	
2	Низька ціна	19		+					

Таблиця 4.12 – SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: 1.Швидкодія та точність стабілізатора 2.Низька ціна 3.Портативність	Слабкі сторони: 1.Строк служби 2.Діапазон кутів наведення в вертикальній площині
Можливості: ексклюзивність стабілізатора швидкий вихід на ринок дешевого та якісного стабілізатора	Загрози: конкуренція з закордонними фірмами-виробниками збут

На основі SWOT-аналізу можна визначити альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок (див. табл. 4.9, аналіз потенційних конкурентів).

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 4.13).

Таблиця 4.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) поведінки ринкової	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Підвищення портативності стабілізатора	Необхідна розробка легкої споруди. Так можна зробити	1 місяць
2	Розширення діапазону кутів наведення у вертикальній площині	Для вирішення даної задачі необхідні додаткові розробки. Можна зробити	3 місяці

Обрано першу альтернативу – підвищення портативності стабілізатора, адже доробка приладу буде тривати лише 1 місяць, що прискорить вихід стабілізатора на ринок.

4.4.Розробка ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 4.14).

Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах сегменту	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Державний концерн “Укроборонпром”	Так, якщо це буде досить швидкий та доступний стабілізатор	Високий	Середня	Середня
2	Закордонні фірми-виробники озброєння	Так, якщо це буде досить якісний, точний та швидкодіючий стабілізатор	Середній	Висока	Висока
Які цільові групи обрано: обрано дві цільові групи, адже даний стабілізатор буде доступний і досить якісний.					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів обираємо цільові групи, для яких пропонується наш товар, та далі визначаємо стратегію охоплення ринку.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку (табл. 4.15).

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
	Підвищення портативності стабілізатора	Весь ринок за рахунок низької вартості та високої якості стабілізатора	Якість, точність та швидкодія стабілізатора	Стратегія лідерства

За результатами аналізу таблиці визначення стратегії розвитку, що базується на підвищенні портативності стабілізатора легкої броньованої техніки. Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл.4.16).

Таблиця 4.16. - Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
	Ні	Буде шукати нових та можливо забирати у конкурентів	Так, адже стабілізатори конкурентів знаходяться вже довго в експлуатації та на озброєнні багатьох країн	За рахунок великих можливостей по об'ємах збуту товарів і продуктивності підприємство зможе добитися менших витрат

За результатами аналізу таблиці визначення стратегії конкурентної поведінки робимо висновок, що даний проект стабілізатора озброєння легкої броньованої техніки не є “першопрохідцем” на ринку, проект буде копіювати деякі характеристики товару конкурентів, адже вони знаходяться на озброєнні багатьох країн.

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту (див. табл. 4.5), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (табл. 4.15) та стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.16) розробляється стратегія позиціонування (табл. 4.17), що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 4.17 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту
	Точність та швидкодія стабілізатора за відносно низьку ціну	Стратегія лідерства	Якість та ціна, зворотний зв'язок та технічна підтримка

Результатом виконання підрозділу є узгоджена система рішень щодо ринкової поведінки стартап-компанії, яка визначає напрями роботи стартап-компанії на ринку.

4.5.Розробка маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у табл. 4.18 підсумуємо результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Висока якість	Швидкодія та точність стабілізатора	Збільшена швидкість наведення у вертикальній та горизонтальній площинах Зменшена середня похибка стабілізації
2	Низька ціна	Доступний стабілізатор	Використання комплектуючих до стабілізатора виготовлених вітчизняними виробниками

Після визначення ключових переваг концепції стабілізатора, розробимо трирівневу маркетингову модель товару: уточняється ідея продукту, його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл.4.19).

Таблиця 4.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Вдосконалений стабілізатор озброєння легкої броньованої техніки		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх/Тл/ Е
	1.Діапазон кутів наведення в вертикальній площині від -7 до +70°	М	Тх
	2.Вага до 50 кг	М	Вр
	3.Точність (кутові хвилини) - 3,6	Нм	Тл
	4.Загальний строк служби- 17 років	М	Тх
	Якість: стандарт АМ1,5		
	Пакування : коробка		
Марка: ПБФ-пром			
III. Товар із підкріплення м	До продажу		
	Після продажу		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патентування товару			

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл. 4.20). Аналіз проводиться експертним методом.

Таблиця 4.20 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
	10 000 грн	30 000 грн	невизначений	10 000 грн – 20 000 грн

В таблиці 4.20 зазначений рівень доходів потенційних клієнтів як невизначений, адже головним клієнтом є державний концерн “Укроборонпром”.

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 4.21):

- проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників (власна або залучена система збуту);
- вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- вибір та обґрунтування виду посередників.

Таблиця 4.21 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	Якість та швидкість роботи імітатору	Тендерні закупівлі	Україна та сусідні країни	Реклама в інтернеті

Головною системою збуту є тендерні закупівлі озброєння для Збройних Сил України. Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл.4.22).

Таблиця 4.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Необхідний якісний та дешевий продукт	Міжнародні спеціальні виставки, конференції, конкурси	Якість та ціна	Наголосити на низькій вартості та високій точності та швидкодії	Ми пропонуємо якість за низькою ціною

За даними таблиці маємо зробити висновок, що концепція маркетингових комунікацій полягає в участі проекту у міжнародних виставках, конференцій та конкурсах, проведеннях рекламних компаній з наголошенням на високу точність та швидкодію стабілізатора за відносно дешевою вартістю, підтримку вітчизняного виробника. Результатом є ринкова (маркетингова) програма, що включає в себе концепції товару, збуту, просування та попередній аналіз можливостей ціноутворення, спирається на цінності та потреби потенційних клієнтів, конкурентні переваги ідеї, стан та динаміку ринкового середовища, в межах якого буде впроваджено проект, та відповідну обрану альтернативу ринкової поведінки.

4.6.Висновки до розділу

Впродовж останніх років набула популярності така форма венчурного підприємництва як стартап. Цьому процесу посприяла поява багатьох інтернет-майданчиків для пошуку інвесторів, ринків збуту та розміщенні своїх проектів. На сьогоднішній день в нашій країні, в умовах гібридної війни, безумовно важливою є можливість кожного громадянина зробити свій вклад у підвищення обороноздатності країни та навігаційної безпеки. Саме тому розробка стартап-проектів є необхідною частиною вдосконалення та розвитку оборонної промисловості України.

В даному розділі було розглянуто проект вдосконалення стабілізатора озброєння легкої броньованої техніки з використанням двоканального п'єзоелектричного гравіметра. Була доведена актуальність розробки даного стартапа, що полягає в значному підвищенні вимог до надійності, швидкодії та точності систем наведення та стабілізації озброєння, а також можливість експлуатації в складних умовах. Також необхідним є зниження витрат часу та коштів на технічне обслуговування.

Під час розробки стартап-проекту було проаналізовано сильні, слабкі та нейтральні властивості вдосконаленого стабілізатора. Безумовно сильними характеристиками виробу є те, що за рахунок оптимізації схемо-технічних рішень та законів управління у вдосконаленому стабілізаторі був скорочений приладовий склад (виключені компенсаційний гіротахометр та окремий блок фільтрів) та зменшена загальна маса, габарити стабілізатора. Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

Головними конкурентами даного проекту є виробни-аналоги як вітчизняних так і закордонних фірм-виробників озброєння. Оскільки в основному виробника озброєння обирають за допомогою проведення тендерів, то конкуренцію можна назвати чистою. Отже, важливе значення має ціна та нецінові чинники (точність, швидкодія, надійність), і саме це дає перевагу перед закордонними розробками, що як правило, дорожчі. Використання стабілізаторів озброєння є розповсюдженим у світі явищем, тому системи для їх контролю необхідні у світовому масштабі. Для цього необхідна участь у міжнародних виставках, конференціях та конкурсах, проводити рекламні кампанії.

Отже, можна зробити висновок, що розробка стартап-проекту вдосконаленого стабілізатора озброєння легкої броньованої техніки є доцільною, фінансово обґрунтованою та з мінімальними ризиками для інвесторів.

ВИСНОВКИ

Існуючі на сьогоднішній день авіаційні гравіметричні системи, в яких застосовані кварцові, магнітні, пружинні, струнні гравіметри, можуть забезпечити недостатню точність авіаційних гравіметричних вимірювань у межах (2–10) мГал. Однак, для ефективного практичного застосування АГС визначена вимога до точності гравіметра АГС на рівні 1 мГал.

Викладені у науковій роботі дослідження дозволили вирішити актуальну і складну науково-технічну задачу, що має важливе значення, – підвищити точність і швидкодію вимірювань прискорення сили тяжіння шляхом використання двоканального п'єзоелектричного гравіметра автоматизованої авіаційної гравіметричної системи. Здобуто такі нові результати:

1. Досліджено новий двоканальний п'єзоелектричний гравіметр автоматизованої АГС більшої точності (1 мГал) від відомих гравіметрів (2 – 10 мГал);
2. Розглянуто схему двоканального п'єзоелектричного гравіметра АГС, що забезпечує підвищення точності вимірювання g у 2 рази та розроблено його математичну модель;
3. Запропоновано автоматизовану АГС із двоканальним п'єзоелектричним гравіметром, яка забезпечує вищу точність (у 2 рази) та швидкодію (у 10 разів) вимірювання Δg , аніж відомі системи та відрізняється від них тим, що у її корисному сигналі відсутнє значення основної завади – вертикального прискорення;
4. Ідентифіковано та досліджено основні похибки двоканального п'єзоелектричного гравіметра, для кожного виду похибок запропоновано заходи по їх зменшенню;

5. Проведено цифрове моделювання на ЕОМ найбільш небезпечних резонансних режимів нового двоканального п'єзоелектричного гравіметра:
 $\omega=\omega_0$, $\omega=2\omega_0$, $\omega=3\omega_0$, $\omega=\omega_0/2$, $\omega=\omega_0/3$;

6. Обґрунтовано доцільність використання нейронних мереж для зменшення інструментальних похибок нового ДПГ та інших складових автоматизованої АГС;

7. Створено нову лабораторну установку та уперше проведено на ній експериментальні дослідження нового двоканального п'єзоелектричного гравіметра;

8. Підтверджено точність вимірювань двоканального п'єзоелектричного гравіметра 1мГал збіжністю результатів аналітичних розрахунків, експериментальних досліджень та результатів моделювання на ЕОМ (у найбільш небезпечних, з точки зору можливості виникнення резонансу).

ІНФОРМАЦІЙНІ ДЖЕРЕЛА

1. Безвесільна, О. М. Вимірювання гравітаційних прискорень [Текст] / О.М. Безвесільна. – Житомир : ЖІТІ, 2002. – 264 с.
2. Безвесільна, О. М. Вимірювання прискорень [Текст] / О. М.Безвесільна. – К.: Либідь, 2001. – 261 с.
3. Патент України на винахід 107637, МПК G 01 V 7/00. Авіаційна гравіметрична система для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння / О.М. Безвесільна, А.Г. Ткачук. – № a2013 15251; Заявл. 26.12.13; опубл. 26.01.15, Бюл. № 2.
4. Безвесільна О.М. Науково-теоретичні дослідження нового п'єзоелектричного гравіметра автоматизованої авіаційної гравіметричної системи в екстремальних умовах з використанням нейронних мереж: монографія / О.М. Безвесільна, А.Г. Ткачук, Г.С. Тимчик. – Житомир : ЖДТУ, 2014. – 224 с.
5. Веселов, К. Е. Гравиметрическая разведка [Текст] / К. Е. Веселов. – М.: Недра, 1968.– 512 с.
6. Веселов, К. Е. Гравиметрическая съемка [Текст] / К. Е. Веселов. – М.: Недра, 1986.– 311 с.
7. Безвесільна, О. М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри [Текст]: монографія / О. М. Безвесільна. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – 604 с.
8. Пат. 99084 Україна, МПК G01V 7/06. П'єзогравіметр / Безвесільна О.М., Подчашинський Ю. О., Ткачук А. Г. – №a 2011 13894; заяв. 25.11.2011; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 13.
9. Шарапов, В. М. Пьезоэлектрические датчики [Текст] / Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Шарапова Е. В. – Москва: Техносфера, 2006. – 632с.
10. Пьезокерамические трансформаторы и датчики [Текст] / В. М. Шарапов, И. Г. Минаев, Ж. В. Сотула, К. В. Базило, Л. Г. Куницкая / Под ред. В. М. Шарапова. – Черкассы: Вертикаль, 2010.– 278с.

11. Шарапов, В. М. Пьезокерамические преобразователи. Новые технологии проектирования [Текст] / В. М. Шарапов, Ж. В. Сотула // Электроника НТБ. – 2012. – №5. – С. 96–102.
12. Безвесільна, О. М. Технологічні вимірювання та прилади. Перетворюючі пристрої приладів [Текст]: підручник / О. М. Безвесільна, Г. С. Тимчик. – Житомир: ЖДТУ, 2012. – 812 с.
13. Кухарчук, В. В. Основи метрології та електричних вимірювань [Текст]: підручник / В. В. Кухарчук, Є. Т. Володарський, В. Ю. Кучерук, В. В. Грабко. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 522 с.
14. Янчич, В. В. Пьезоэлектрические датчики вибрационного и ударного ускорения [Текст]: Учеб. Пособие / В. В. Янчич. – Ростов-на-Дону, 2008. – 77 с.
15. Янчич, В. В. Пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи (акселерометры) [Текст]: монография / В. В. Янчич. – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2010. – 304 с.
16. Смажевская, Е. Г. Пьезоэлектрическая керамика [Текст] / Е. Г. Смажевская, Н. Б. Фельдман – М.: Сов. радио, 1971. – 199 с.
17. Таблицы основных свойств пьезокерамических материалов ПКР, изготавливаемые Отделением сегнетопьезоэлектрических материалов, приборов и устройств НИИ физики ЮФУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.piezotech.ru/PKR.htm>. – Название с экрана
18. Безвесільна, О. М. Гравіметри та їх виставка [Текст]: монографія / О.М. Безвесільна, А. А. Остапчук, С. С. Ткаченко. – Житомир : ЖДТУ, 2010. – 307 с.
19. Земельман, М. А. Метрологические основы технических измерений [Текст] / М. А. Земельман. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 227 с.
20. Самотокін, Б. Б. Лекції з теорії автоматичного керування [Текст] / Б. Б. Самотокін. – Житомир : ЖІТІ, 2001. – 508 с.
21. Леонтьев, М. К. Виброметрирование авиационных ГТД [Текст]: Учебное пособие / М. К. Леонтьев. – М.: Изд-во МАИ, 1998. – 20с.

22. Засоби вимірювання екологічних параметрів [Текст]: підручник / [Безвесільна О. М., Войницький А. П., Єльнікова Т. О. та ін.]. – Житомир: ЖДТУ, 2009. – 508с.
23. Підсилювач INA116 [Електронний ресурс] / „Texas Instruments”. – Режим доступу : <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina116.pdf>. – Назва з екрану.
24. Справочник по схемотехнике усилителей [Текст] / Ю.С. Ежков. – М.: ИП, РадиоСофт, 2002. – 272 с.
25. Логический модуль m-DAQ [Електронний ресурс] / “HOLIT Data Systems Ltd”. – Режим доступа: <http://holit.ua/download/common/docs/hds/m-DAQ.pdf>. – Заглавие с экрана.
26. Mohinder, S. Grewal Global positioning systems, inertial navigation, and integration [Text] /Mohinder S. Grewal, Lawrence R. Weill, Angus P. Andrews – Hoboken, New Jersey : Wiley-interscience a John Wiley & Sons Inc., 2007. – 525 p.